

ANWENDUNGSOPTIMIERTE
BILDVERARBEITUNG
VON FERNERKUNDUNGSDATEN
UND AEROMAGNETISCHEN DATEN
IN HINBLICK
AUF DIE GRUNDWASSERPROSPEKTION
IM SAHEL BURKINA FASOS

Günther Kohlhammer



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41554610_0002

ANWENDUNGSOPTIMIERTE BILDVERARBEITUNG
VON FERNERKUNDUNGSDATEN UND AEROMAGNETISCHEN DATEN
IN HINBLICK AUF DIE GRUNDWASSERPROSPEKTION IM SAHEL
BURKINA FASO

Inaugural - Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
an der Fakultät für Geowissenschaften
der
Ludwig - Maximilians - Universität
München

vorgelegt von
Günther Kohlhammer

München, 15.7.1986

1. Berichterstatter : Prof. Dr. J. Bodechtel
2. Berichterstatter : Prof. Dr. W.-D. Grimm

Tag der mündlichen Prüfung : 1.12.1986

GLIEDERUNG

	Inhaltsverzeichnis	Seite
	Abbildungsverzeichnis	
	Abkürzungen	
EINLEITUNG	Zusammenfassung	1
	Abstract	3
	Vorwort	5
	Arbeitsablauf	8
I. DAS ARBEITSGEBIET		9
1.1	Lage und Bevölkerung	9
1.2	Geomorphologie	10
1.3	Klima	11
1.4	Vegetation	14
1.5	Wasserbedarf	16
2	Geologischer Rahmen	18
2.1	Überblick über die Geologie von Burkina	18
2.2	Tektonische Entwicklung in Burkina	21
3	Geologische Übersicht über den Oudalan	22
3.1	Bisherige Arbeiten	22
3.2	Geologische Entwicklung	26
3.2.1	Das Antebirrimien (Präkambrium D)	26
3.2.2	Das Präkambrium C	26
3.2.3	Das Präkambrium A und Infrakambrium	27
3.2.4	Tertiär und Quartär	27
3.3	Strukturen	28
3.4	Zusammenfassung des Präkambrium im Oudalan	30
4	Hydrogeologie	31
4.1	Einführung, Übersicht	31
4.2	Grundwasservorkommen im Sahel Burkinas	32
4.2.1	Alluvionen	33
4.2.2	Verwitterungszone	33
4.2.3	Klüfte	35
4.3	Infiltration, Grundwassererneuerung	37
4.4	Jüngere hydrogeologische Projekte im Sahel Burkinas	39
4.4.1	Ergebnisse	39
4.4.2	Kritik und Probleme	41

II. METHODIK DER GRUNDWASSERPROSPEKTION IN BURKINA FASO

1	Übersicht	42
2	Fernerkundungsdaten und Interpretations- methoden	43
2.1	Satellitenbilddauswertung von	
	Landsat-MSS-Daten	43
2.1.1	Lineamentauswertung	44
2.1.1	Gewässernetz- und Vegetationsauswertung	45
2.2	Luftbilddauswertung	46
2.3	Kombinierte Strukturkarte aus Satelliten- und Luftbildlineamenten	47
3	Bohrpunktfestlegung im Gelände	47
3.1	Allgemeine Kriterien	47
3.2	Geophysikalische Geländemessungen	48
3.2.1	Geoelektrische Sondierung	48
3.2.2	Geoelektrische Horizontalprofilmessung	48
3.2.3	Elektromagnetik, Seismik	49
4	Magnetische Daten in der Grundwasser- prospektion	49
4.1	Bodenmagnetik	50
4.2	Aeromagnetik	52
4.2.1	Aeromagnetische Daten in Burkina	52
4.2.2	Aeromagnetische Daten in der Kluftwasserprospektion	52
5	Weitere Interpretationsgrundlagen	55
5.1	Topographische Karten	55
5.2	Geologische Karten	56
5.3	Pedologische Karten	56
5.4	Vegetationskarten	56
5.5	Klimatologische Daten	57
6	Methodische Zusammenfassung und Kritik	57

III. KONZEPTION UND ENTWICKLUNG SPEZIELLER FERNERKUNDUNGS- UND BILDVERARBEITUNGSVERFAHREN ZUR ANWENDUNG IN DER GRUNDWASSER-PROSPEKTION IM SAHEL BURKINA FASO

1	Einführung	60
2	Einsatzmöglichkeit neuer Fernerkundungssysteme in Burkina	62
2.1	Verfügbare neuere Fernerkundungsdaten in Burkina	62
2.2	Einsatzmöglichkeiten neuerer Fernerkundungssysteme zur Kluftwasserprospektion in Burkina Faso	63
2.2.1	Spot-Simulationsdaten	64
2.2.2	Thematic Mapper (TM)	66
2.2.3	MOMS	67
2.2.4	Metrische Kamera	68

Anwendungsorientierte Bildverarbeitungen speziell für hydrogeologische Auswertungen in N-Burkina Faso

3	Übersicht	70
4	Kontrastverstärkung zur verbesserten Interpretierbarkeit von Lineamenten	74
4.1	Die Highpassfilterung	74
4.2	Die Add-back-Highpassfilterung	76
4.3	Spezielle Untersuchungen zur Highpassfilterung im Bereich Markoy an panchromatischen Spot-Daten	77
4.3.1	Filtergröße und Strukturgröße	77
4.3.2	Filtergröße und Grauwertverteilung	78
4.3.3	Vorgestreckter Add-back-Highpass	81
4.4	Hauptachsentransformation	83

5	Untersuchungen zur Darstellung der Vegetation aus Landsat MSS-Daten	84
5.1	Überblick	84
5.2	Darstellung der Januarvegetation im Sahel	85
5.2.1	Allgemeines	85
5.2.2	Verbesserte Darstellung der spärlichen Busch- und Grasvegetation	87
5.3	Darstellung von Vegetationsunterschieden	91
5.4	Zusammenfassung	93
6	Kombination von Fernerkundungsdaten mit geophysikalischen (aeromagnetischen) Daten	95
6.1	Einführung	95
6.2	Das verwendete GIS-Softwaresystem	98
6.2.1	Digitalisierung von thematischen Karten	98
6.2.2	Interpolation	99
6.2.3	Steigungsberechnung	99
6.3	Anwendung eines GIS zur Überlagerung von aeromagnetischen Daten mit Satelliten- daten	100
6.3.1	Übersicht	100
6.3.2	Steigungsanalyse	101
6.3.3	Bewertung, Kritik	102
6.3.4	Empfehlungen für die Isolinien digitalisierung	104
6.4	Darstellung integrierter Daten durch die Bildverarbeitung	105
6.4.1	Übersicht	105
6.4.2	Geometrische Korrektur	107
6.4.3	IHS - Darstellung	108
6.4.4	Synthetischer Stereoeffekt	111
6.4.5	Dodging	112
7	Zusammenfassung, Diskussion	114

8	Bildprodukte	117
8.1	Vegetationsdarstellung aus der Januaraufnahme von Landsat Band 6	117
8.2	Kombinierte Bildprodukte aus Spot- Simulationsdaten und aeromagnetischen Daten	121
8.2.1	IHS-Darstellungen	121
8.2.2	Stereoskopische Darstellungen	123

IV. AUSWERTUNG, THEMATISCHE UND METHODISCHE ERGEBNISSE

1	Übersicht	125
2	Auswertungen von Landsat-MSS-Daten im regionalen Maßstab (1:200 000) im Gebiet des Blattes Dori	126
2.1	Lineament- und Strukturinterpretation	127
2.2	Vergleich der interpretierten Strukturen mit bekannten Brunnen	128
2.3	Lineamentkreuzungspunkte	129
2.4	Lineamentrichtungsauswertung	129
2.5	Gewässernetzauswertung	132
2.6	Lineamentdichte, Kreuzungspunktdichte, Gewässernetzdichte	135

3	Auswertungen im lokalen Rahmen im Gebiet Salmossi-Markoy	138
3.1	Lokale Auswertung der Landsat MSS Falschfarbendarstellung	138
3.2	Auswertungen von Luftbildern, Spot- Falschfarbendarstellungen und Über- lagerungen von Spot- und aeromagne- tischen Daten	140
3.2.1	Lineamentauswertung	140
3.2.2	Auswertung der Lineamentrichtungen	141
3.2.3	Direkter Lineamentvergleich	142
3.2.4	Lineamentdichten	143
3.2.5	Abflußrichtungen	145
3.2.6	Richtungsfilterungen von Lineamenten	146
3.2.7	Lokalisierung grundwasserhöffiger Punkte	147
	ZUSAMMENFASSUNG	150
	DISKUSSION	153
	AUSBLICK	156
	LITERATUR	
	ANHANG	

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb.	0	Arbeitsablauf	7
Abb.	1	Geograph. Lage des Arbeitsgebietes	9a
Abb.	2	Mittlerer Jahresniederschlag, Isohyetenkarte	11
Abb.	3	Niederschlag und Anzahl der Regentage in Markoy	12
Abb.	4	Evapotranspiration und Niederschlag in Dori	12
Abb.	5	Mittlere Maximal- und Minimaltemperaturen in Dori	12
Abb.	6	Vegetationsprofile südsahelischer Vegetation	15
Abb.	7	Die Kratone Afrikas	18
Abb.	8	Geologische Übersichtskarte von Burkina Faso	19
Abb.	9	Gravimetrische Anomalien und Strukturkarte des Blattes Dori	23
Abb.	10	Geologische Übersichtskarte des Oudalan	25
Abb.	11	Entwässerungsnetz in Burkina	31
Abb.	12	Schematisches Profil durch die Verwitterungszone	33
Abb.	13	Schematische Darstellung der Grenze Ausgangsgestein/Verwitterungszone	34
Abb.	14	Schematischer Aufbau eines Kluftwasserleiters	37
Abb.	15	Vergleich eines magnetischen und eines geoelektrischen Profiles	50
Abb.	16	Magnetisches Profil senkrecht zu einem Doleritgang	51
Abb.	17	Ergiebkeit von Brunnen und ihre Entfernung zur nächsten "aeromagnetischen" Störung	53
Abb.	18	Ergiebkeit von Brunnen relativ zur Entfernung von "aeromagnetischen" Störungen	53
Abb.	19	Vergleiche geoelektrischer Bodenprofile mit aeromagnetischen Profilen	54
Abb.	20	Fernerkundungsdaten in Burkina	62
Abb.	21	Grauwertprofil bei der Highpassfilterung	75
Abb.	22	Grauwertänderung durch die Add-back-Highpass-Filterung	76
Abb.	23	Spot-Ausschnitt bei verschiedenen Highpass-Filtergrößen	79
Abb.	24	Spot-Ausschnitt bei verschiedenen Add-back-Highpass- Filtergrößen	80
Abb.	25	Grauwertverteilung nach vorgestreckter und nicht vorgestreckter Add-back-Highpass-Filterung	82
Abb.	26	Reflexionskurve vegetationsbedeckter Oberflächen und Spektralkanäle verschiedener Aufnahmesysteme	84
Abb.	27	Reflexion einer vegetationsbedeckten Oberfläche im MSS-Kanal 5 und 7	85
Abb.	28	Vegetation im MSS-Kanal 7 und im Ratio MSS6/MSS5	89
Abb.	29	Verarbeitungsschema zur Darstellung in der Trockentalvegetation,	92
Abb.	30	Theoretisches Reflexionsverhalten von Chlorophyll im Gegensatz zur Trockental- und Dünenvegetation	93
Abb.	31	Struktur eines geographischen Informationssystems	95
Abb.	32	Kombination von GIS- und Bildverarbeitungssoftware	97
Abb.	33	Aeromagnetische Karte, Ausschnitt Salmossi-Markoy	100a
Abb.	34	Grautondarstellung der aeromagnetischen Karte	100b
Abb.	35	Grautondarstellung des Unterschiedes der aeromagn. Totalintensität	101a
Abb.	36	RGB-Würfel mit IHS-Kegel	109
Abb.	37	Histogramme der Landsat-MSS-Kanäle	118
Abb.	38	Farbäquidensiten zur Vegetationsdarstellung	119
Abb.	39	Kombinierte Strukturkarte , Blatt Dori	127a
Abb.	40	Strukturkarte und bekannte Brunnen	128a
Abb.	41	Lineamentkreuzungspunkte, Blatt Dori	129a
Abb.	42	Statistische Lineamentrichtungsauswertung	129

Abb. 43	Gewässernetz, Blatt Dori	132a
Abb. 44	Gewässernetz und Hauptabflußrichtungen	132b
Abb. 45	Horton's Law of Stream Numbers	134
Abb. 46	Lineamentdichte, Blatt Dori	136a
Abb. 47	Dichte der Lineamentkreuzungspunkte, Blatt Dori	136b
Abb. 48	Gewässernetzdichte, Blatt Dori	136c
Abb. 49	Gewässernetz, Lineamente und dichte Vegetation zwischen Salmossi und Markoy nach Landsat MSS-Daten	139
Abb. 50	Lineamentauswertung, Spot-panchromatisch	140a
Abb. 51	Lineamentauswertung, Spot-Falschfarbe	140a
Abb. 52	Lineamentauswertung, Luftbild	140b
Abb. 53	Lineamentauswertung, Überlagerung Spot-Pan./Aeromagnetik	140b
Abb. 54	Lineamentrichtungsauswertung, Spot-Pan. u. Spot-Falschfarbe	141a
Abb. 55	Lineamentrichtungsauswertung, Luftbild u. Überlagerung	141a
Abb. 56	Dichteverteilung der Luftbildlineamente	143a
Abb. 57	Dichteverteilung der Lineamente der Überlagerung	143a
Abb. 58	Geologische Karte, Salmossi-Markoy	144a
Abb. 59	Oberflächenbedeckung, Salmossi-Markoy	144a
Abb. 60	Oberflächenentwässerungsrichtungen	145a
Abb. 61	Richtungsgefilterte Luftbildlineamente 0-45°	146a
Abb. 62	Richtungsgefilterte Überlagerungslineamente 0-45°	146a
Abb. 63	Richtungsgefilterte Luftbildlineamente 20-50°	146b
Abb. 64	Richtungsgefilterte Überlagerungslineamente 20-50°	146b
Abb. 65	Interpretation grundwasserhöflicher Punkte	148a

TABELLEN

Tabelle 1	Zusammenfassung des Präkambrium im Oudalan	93
Tabelle 2	Methodik und Aussagemöglichkeiten in der Grundwasserprospektion in Burkina	59
Tabelle 3	Bezugsadressen für Fernerkundungsdaten	63
Tabelle 4	Spot-System-Charakteristika	64
Tabelle 5	Landsat TM Systemparameter	66
Tabelle 6	MOMS-Systemparameter	67
Tabelle 7	Metrische Kamera in Burkina	69
Tabelle 8	Anzahl besetzter Grauwerte nach der Highpass-Filterung	78
Tabelle 9	Zusammenfassende Konzeption zur Optimierung der Bildauswertebasis	114
Tabelle 10	Zusammenfassung von Lineamentrichtungsmaxima	130
Tabelle 11	Bevorzugt Kluftwasserführende Lineament- und Störungsrichtungen	131
Tabelle 12	Bifurkationsverhältnis und Lithologie	135

FARBABBILDUNGEN

Bild 1	Vegetationsdarstellung in additiver Farbmischung	93
Bild 2	Geländephotos, Lineamentkreuzungspunkt	149
Bild 3	Vegetation durch Grauwertäquidensitenfilterung aus MSS-Kanal 6	120
Bild 4	IHS-Überlagerung von Spot-Pan. und Aeromagnetik	122a
Bild 5	IHS-Überlagerung von Spot-Pan. und magn. Totalintensitätsänderung als Farbäquidensiten	122b
Bild 6+7:	Synthetisches Stereopaar aus Spot-Falschfarbe und der Aeromagnetik	(Falttasche)
Bild 8+9:	Synthetisches Stereopaar aus Spot-Falschfarbe und der Totalintensitätsänderung	(Falttasche)

ABKÜRZUNGEN

BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BMFT	Bundesministerium für Forschung und Technologie
BRGM	Bureau de Recherche géologique et minière
BUMIGEB	Bureau des mines et de la géologie de Burkina Faso früher BUVOGMI
CIEH	Comité interafricain d'études hydrauliques
CRTO	Centre regionale de télédétection de Ouagadougou
ESRI	Enviromental Systems Research Insitute Inc.
FAO	Food and Agriculture Organisation
FC	False color
GIS	Geographisches Informationssystem
GTZ	Gesellschaft für technische Zusammenarbeit
HER	Direction de l'hydraulique et de l'équipement rurale
IHS	Intensity-Hue-Saturation Farbmodell
IR	Infrarot
ITC	International Institute for aerial survey and earth sciences
MOMS	Modular Optoelectronic Multispectral Sanner
MSS	Multispektral Scanner
ORSTOM	Office de Recherches Scientifiques et Techniques Outre- Mer
Pixel	Picture Element
RGB	Rot-Grün-Blau Farbsystem
Spot	Système probatoire d'observation de la terre
SST	Synthetisches Stereo
S/W	Schwarz-Weiß
TM	Thematic Mapper

ZUSAMMENFASSUNG

Im Sahel Burkina Fasos, einem von der zunehmenden Ausbreitung der Wüste bedrohten Gebiet mit schwach sandbedecktem, kristallinem Untergrund, erfolgt die Prospektion nach hauptsächlich kluftgebundenem Grundwasser in 3 Phasen:

1. Die Lokalisierung grundwasserhöffiger Zonen aus Landsat-MSS-Falschfarbendarstellungen in Maßstäben < 1:200 000,
2. Die Auswertung von Schwarz-Weiß Luftbildern (1:50 000),
3. Die Geländearbeit, z.T. mit geoelektrischer Profilnahme zur endgültigen Festlegung des Bohrpunktes.

Es ist das Ziel der vorliegenden Arbeit, verbesserte, speziell der thematischen Zielsetzung und den Voraussetzungen in Burkina angepasste Bildverarbeitungen für die ersten beiden Prospektionsphasen zu erarbeiten und darzustellen und so die 3. Phase, die Geländearbeit, zu effektivieren.

Solche verbesserten, speziell für die Kluftwasserprospektion im Sahel erzeugten Bildprodukte von Fernerkundungsdaten können erzeugt werden:

- durch den Einsatz von Daten neuerer, geometrisch höher und spektral enger auflösender Aufnahmesysteme wie TM, Spot, MOMS,
- durch die Verarbeitung dieser Daten speziell für die Struktur- und Vegetationsinterpretation,
- durch die Überlagerung der fernerkundlichen Daten mit anderen, geophysikalischen Daten,
- durch eine optimale bildhafte Präsentationsform der Daten.

In den Maßstäben 1:200 000 auf der Basis von Landsat-MSS-Daten und 1:50 000 auf der Basis von Spot-Simulationsdaten, Luftbildern und aeromagnetischen Karten wurden solche Verarbeitungen erzeugt, verglichen, im Gelände überprüft, mit den Prospektionsgeologen vor Ort diskutiert, weiter verbessert und exemplarisch interpretiert.

Eine Highpassfilterung mit einer Filtergröße, die der Breite der zu verstärkenden Strukturen angepasst war, diente dabei der Kontrastverstärkung. Die Vegetationsinformation wurde je nach Typ, nach Spektralkanälen des Aufnahmesystems und nach Aufnahmezeitpunkt durch eine Filterung ihres reflexionsmindernden Einflusses auf die Bodenreflexion oder durch eine optimierte Darstellung ihrer Chlorophyllreflexion verdeutlicht.

Die Überlagerung mit aeromagnetischen Daten, den einzigen flächendeckenden Meßdaten im Arbeitsgebiet, oder dem magnetischen Totalintensitätsunterschied erlaubte das Weiterverfolgen kluftwasserhöffiger Störungszonen auch unter der Sand- und Dünenbedeckung.

Das resultierende Bildprodukt enthält so ein Maximum interpretierbarer, themenrelevanter Information, wobei die Informations-ebenen Reflexion und Totalintensität sowohl einzeln, als auch in ihrer Synopsis interpretierbar sind.

Als beste Interpretationsgrundlage zur Lokalisierung grundwasserhöffiger Kluftzonen im Sahel erwies sich eine highpassgefilterte, gedodgte Spot-Falschfarbendarstellung mit synthetisch berechnetem Stereoeffekt aus den aeromagnetischen Daten, bzw. dem Totalintensitätsunterschied.

Die nur wenig chlorophyllhaltige Dornbusch- und Steppengrasvegetation ist, anders als die Trockentalvegetation, am besten aus einer Farbbäquidensitendarstellung derjenigen Grauwerte interpretierbar, die sich aufgrund der reflexionsmindernden Wirkung der Vegetation von der reinen Bodenreflexion unterscheiden.

Exemplarische Auswertungen, regional für das Blatt Dori und lokal für das Gebiet zwischen Salmossi und Markoy führten zur Lokalisierung potentieller Bohrpunkte in diesem Gebiet, zeigten aber auch die Probleme herkömmlicher Auswertemethoden.

Die beschriebenen Verfahren zur Interpretationsoptimierung von Bilddaten können auch in anderen Wüstenrandbereichen mit Kluftwasserkörpern und sandiger Bedeckung eingesetzt werden, besonders seit TM und Spot regelmäßig Daten dieser Gebiete in der nötigen Qualität liefern.

Der finanzielle Mehraufwand für anwendungsspezifische Verarbeitungen wird durch eine verbesserte Interpretationsgrundlage, eine effektivere Geländearbeit und damit eine sinkende Zahl von Fehlbohrungen und höhere Ergiebigkeiten ausgeglichen.

ABSTRACT

In the Sahelian zone of Burkina Faso, an area of partly sand-covered crystalline basement which is threatened by desertification, groundwater prospecting consists of 3 steps:

1. interpretation of Landsat MSS false-color images in scales <1:200 000 to locate potential groundwater zones,
2. interpretation of black-and-white aerial photos (1:50 000),
3. field work with some geoelectric-profile measurements to locate exact drilling point.

Based on this conception, the goal of this project is to develop improved images, adapted to hydrogeological purposes and interpretation conditions in Burkina. Field work may be improved by more accurate interpretation of such thematically optimized images.

Such improved images for joint-water prospecting in the Sahel of Burkina will be generated in the following manner:

- by use of data from newer, geometrically higher and spectrometrically closer resolving sensors, such as TM, Spot and MOMS
- by processing methods which optimize structural and vegetational information content within the images,
- by superposition of geophysics and remote sensing data,
- by optimal presentation of the information content in the interpretation base.

These data processings have been tested with Landsat MSS data on a scale of 1:200 000 and with Spot-simulation data, aeromagnetic data and aerial photos on a scale of 1:50 000. The processed images and the interpretations were compared with each other and verified by ground truth. After discussion with potential interpreters in Burkina a final processing was obtained.

For contrast enhancement the images have been highpass-filtered with a filtersize, which has been adapted to the size of geological structures.

Vegetation is visualized by filtering its diminishing effect on ground reflection or by enhancement of its chlorophyll reflection. The precise method depends on the type of vegetation, the imaging system and the imaging date.

Superposition of remote sensing data with either aeromagnetic data or differential magnetic total-intensity data will also allow the detection and outline of fracture zones in a partly sand- and dune-covered area.

In such superpositions individual data sets may be interpreted individually and jointly.

In this study the best interpretation base for locating potential joint-water zones in the Sahel of Burkina was found to be a highpass filtered and dodged Spot-simulation false color image with synthetic stereoeffect by magnetic total intensity or differential magnetic total-intensity.

The dry and sparse vegetation in the dry season is presented best in a filtered grey equidensity image. Colors in this image mark zones with diminished ground reflexion, probably as a result of dry vegetation cover.

The results of this study also exemplarily locate potential drilling points between the villages of Salmossi and Markoy. These points have to be verified on further site studies.

The interpretation also shows some problems with currently used interpretation methods.

The described processings for thematic image optimization may be transferred to groundwater prospecting in other semiarid regions with jointwater aquifers and partial a sedimentary cover, especially since TM and Spot data in the necessary quality is often available.

Thematically optimized data processing and presentation is more expensive than standard processings. However this method increases the effectivity of field work and augments success rate and yield. Therefore, total cost for a minimum watersupply in the Sahel is lowered in comparison with conventional standard methods.

VORWORT

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des BMFT-Projektes 01 QS 0730 im Zeitraum zwischen Mai 1983 und April 1986 in der Arbeitsgruppe für geowissenschaftliche Fernerkundung (Leitung Prof. Dr. J. Bodechtel) an der Fakultät für Geowissenschaften der Universität München durchgeführt.

Das BMFT-Forschungsvorhaben umfasste die Abschätzung von Einsatzmöglichkeiten eines geographischen Informationssystems zur Nutzung von Fernerkundungsaufnahmen in Zusammenhang mit thematischen Karten.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes war es das Ziel der Arbeit, spezielle, anwendungsoptimierte Bilddarstellungen von Fernerkundungs- und anderen Meßdaten zu erarbeiten.

Um die Ergebnisse dieser Untersuchungen direkt in der praktischen Anwendung einsetzen zu können, wurde nach Konsultationen und mit Unterstützung der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) die Grundwasserprospektion im Sahel Burkina Fasos, einem besonders in den letzten Jahren wieder klimatisch stark benachteiligten Gebiet, als thematisches Ziel gewählt.

Die Arbeit dient somit konkret der Entwicklung und Erarbeitung verbesserter Interpretationsgrundlagen für die erste Prospektionsphase der Grundwassererschließung im Sahel.

Zunächst müssen dazu die geologischen und hydrogeologischen Grundlagen sowie die spezielle Problematik des Arbeitsgebietes erfasst, vorhandene Daten gesammelt und auf ihren Aussagegehalt und ihre Eignung zur digitalen Verarbeitung hin überprüft werden. Die für Burkina vorliegenden Fernerkundungsdaten sind ausführlich beschrieben, um den Anwendern einen Überblick über neuere Systeme und deren Aufnahmekapazität und Datenqualität zu geben.

Aufbauend auf der bisherigen Prospektionsmethodik, den vorhandenen oder in naher Zukunft erhältlichen Daten und unter Berücksichtigung der Auswertekapazität in Burkina wird die Konzeption für die Entwicklung dieser verbesserten, anwendungsoptimierten Bildprodukte erstellt. Der direkte Kontakt zu potentiellen Interpreten und die Gelände- und thematische Grundlagenkenntnis sind Voraussetzung für solche Verarbeitungen.

Die exemplarischen Auswertungen in dieser Arbeit dienen in erster Linie der Kontrolle und Verbesserung der Bildprodukte und der Interpretationsmethodik. Auch wenn diese Auswertung mit der gro-

ben Lokalisierung grundwasserhöffiger Punkte abschließt, kann die endgültige Entscheidung über Bohrpunkte nur vom erfahrenen, mit dem Gelände vertrauten Prospektionsgeologen vor Ort getroffen werden. Die Interpretation solcher Spezialverarbeitungen muß in der Praxis ihm überlassen bleiben.

Für die Verarbeitung solcher Bildprodukte bedeutet dies, daß nur reine Meßdaten verwendet werden dürfen, nicht aber bereits interpretierte Karten, die in der verarbeiteten Form ihre Unvollständigkeit oder mangelnde Genauigkeit nicht mehr als solche erkennen lassen und den Interpreten zu falschen Ergebnissen führen.

Die einzigen, flächendeckenden, echten Meßdaten des Sahel sind die der Reflexion und der magnetischen Totalintensität. Geologische, pedologische und Lineamentdichtekarten genügen dieser Anforderung nicht und werden daher getrennt ausgewertet.

Die Möglichkeit in diesem Projekt methodische Überlegungen der Bildverarbeitung und der Anwendung eines geographischen Informationssystems mit einer konkreten angewandt-geologischen Fragestellung zu verbinden wurde von vielen Seiten unterstützt.

Herr Dr. Haydn lieferte mit seinen Arbeiten und vielen fruchtbaren Diskussionen die Grundlage und den Leitfaden für die Entwicklung anwendungsoptimierter Bildprodukte. Herrn Dr. Henkel und ihm verdanke ich die nötige Kenntnis der digitalen Bildverarbeitung. Mit viel Geduld und ihrer Erfahrung unterstützten mich beide bei den immer wieder neu auftauchenden datentechnischen Problemen.

Die Unterstützung auf der Anwenderseite des Verhabens war sehr vielfältig. Herr Dr. Kruck und Herr Prof. Böckh von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe unterstützten mich mit ihrer hydrogeologischen Erfahrung in Westafrika bei den das Arbeitsgebiet betreffenden anwendungsorientierten Fragen. Ihre kritische Diskussion meiner Bildprodukte gab mir bei den zahlreichen Konsultationen immer neue Impulse.

Ohne die Unterstützung der Behörden und Institute in Ouagadougou wäre die Geländearbeit und Datenbeschaffung in Burkina nicht möglich gewesen. Besonders erwähnt seinen daher die Herren Madier und Parnot vom Fernerkundungszentrum (CRTO), Herr Taho vom geologischen Dienst (BUMIGEB), Herr Dir. Dr. Sawadogo von der Wasserbehörde (HER), Herr Armand vom BRGM, Herr Albergel von ORSTOM, aber auch die Herren Winkler, Leuchtmann und Sepp der deutschen GTZ-Projekte.

Für ihr Interesse ebenfalls danken möchte ich Herrn Dr. Reichelt, Herrn Jörgensen vom Consulting Krüger A/S und Herrn van der Sommen von IWACO.

Mein Freund Gouem Passouma erleichterte mir die anstrengenden Aufenthalte in Burkina Faso sehr und brachte mir dieses Land mit seinen Problemen und seiner Vielfalt sehr viel näher.

Mein Betreuer Herr Prof. Dr. J. Bodechtel unterstützte diese Arbeit durch sein kritisches Interesse und die Möglichkeit, die Einrichtungen der Arbeitsgruppe am Institut für allgemeine und angewandte Geologie zu benutzen. Für letzteres sei auch Herrn Prof. Dr. K.W. Diefenbach gedankt. Weitere Anregung und Unterstützung erhielt ich von Herrn Dr.F. Jaskolla.

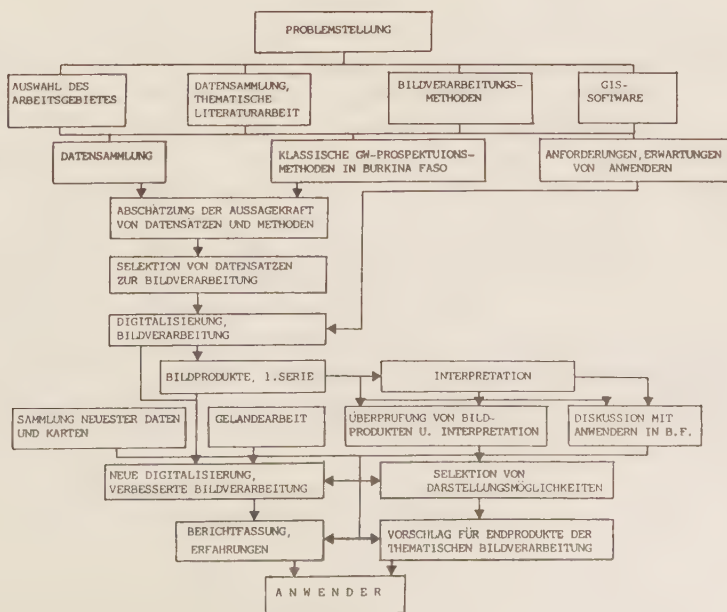
Meinem Freund und Kollegen P.Volk verdanke ich die beste Zusammenarbeit während des ganzen Forschungsvorhabens und weit darüber hinaus. Auch K. Arnasson war mit seinen kritischen Gedanken und seinem Humor eine wichtige Stütze. Und nicht zuletzt möchte ich mich bei allen meinen Freunden, meinen Eltern und meiner Freundin Ellen für die sicher nicht immer einfach aufzubringende Geduld und Hilfestellung bedanken.

Abb.0 Arbeitsablauf im Rahmen des BMFT-Forschungsprojektes

Juni '83

Jan/Feb '84
1.Gelände-
aufenthalt

Jan/Feb '85
2.Gelände-
aufenthalt



ARBEITSABLAUF

Eine erste Phase im Arbeitsablauf (Abb. 0) diente der thematischen Einarbeitung in die Grundwasserprospektionsmethodik in Burkina. Dabei wurden neben den rein hydrogeologischen auch ökologische und ökonomische Faktoren der Grundwasserprospektion im Sahel berücksichtigt.

Zur selben Zeit war die Einarbeitung in die vorhandene Bildverarbeitungssoftware der Arbeitsgruppe für geowissenschaftliche Fernerkundung, sowie in die neu angeschaffte GIS-Software nötig. Der erste Geländeaufenthalt, Anfang 1984, diente dem Kontakt mit den zuständigen Behörden und Instituten in Burkina. Existierende Daten mußten beschafft und überprüft und die Anforderungen von Nutzern und Interpreten von Fernerkundungsdaten definiert werden. Nach weiteren Grundlagenstudien zur Hydrogeologie des Arbeitsgebietes ergaben die meisten der anfangs zahlreichen Datensätze wenig Eignung für die Fragestellung. Entweder war die geometrische Genauigkeit ungenügend, die Daten nur punktuell vorhanden oder der Zusammenhang zur Grundwasserhöflichkeit nicht definierbar.

Anhand der verbleibenden Daten von Landsat und Luftbildern und neu von Spot, MOMS und der Aeromagnetik wurden Untersuchungen zur Optimierung der Verarbeitung und Darstellung durchgeführt.

Eine Serie erster Bildprodukte konnte Anfang 1985 im Gelände erfolgversprechend überprüft werden. Aber auch Unzulänglichkeiten in den Darstellungen wurden dabei ermittelt und mit den zuständigen Stellen in Burkina diskutiert.

Nach diesem 2. Geländeaufenthalt wurden einzelne Verarbeitungen weiter verbessert und andere durch neue Darstellungsformen ersetzt.

Die resultierenden Bildprodukte, sowie ihre exemplarische Auswertung stehen den zuständigen Stellen in Burkina zur Verfügung.

Inzwischen werden die dabei gemachten Erfahrungen in der Bildverarbeitung für Projekte in anderen Teilen Burkinas umgesetzt und beispielsweise von der BGR praktisch eingesetzt. Erste Auswertungen und Bohrerergebnisse werden ab 1987 zur Verfügung stehen.

I. DAS ARBEITSGEBIET

1.1 Lage und Bevölkerung (nach BFAI, 1982 u. Fischer, 1984)

Das Arbeitsgebiet liegt im N-Teil Burkina Fasos (bis 1984: Ober-volta) in Westafrika. Laut FAO gehört das Land zur Gruppe der Ärmsten der Entwicklungsländer. Bei einer Bevölkerung von 7,5 Mio auf einer Gesamtfläche von 275 000 km², d. h. 26 Einwohnern/km² ist das Land, verglichen mit Mali (5,9 E/km²) und dem Niger (4,5 E/km²) noch relativ dicht besiedelt (BRD: 250 E/km²). Der Anteil der städtischen Bevölkerung hat sich in den letzten 15 Jahren, mitbedingt durch anhaltende Dürreperioden, besonders durch Zuwanderung aus der Nordhälfte des Landes mehr als verdreifacht.

Das Departement Sahel umfasst den Norden Burkinas und grenzt in NW an Mali und im NE an Niger. Von diesem Gebiet zwischen 14⁰ und 15⁰ nördlicher Breite und 0⁰ und 1⁰ westlicher Länge wurde ein Ausschnitt detaillierter untersucht.

Die Bevölkerungsdichte liegt hier nur noch bei 3 E/km². Den Großteil davon bilden die ethnischen Gruppen der Peul und Bella. Sonraï und Tuareg sind Minderheiten.

Haupteinnahmequelle aller Gruppen ist die Viehzucht, deren Schwerpunkt sich in den letzten Jahren vom Rind auf die Ziege verlagert hat.

Während und kurz nach der Regenzeit wird in begünstigten Bereichen der Anbau von Hirse (Pennisetum und Sorghum) betrieben. Um die periodisch wasserführenden Seen, die sogenannten "Mare", in einzelnen Trockentälern und z.T. an den Nordabdachungen von Dünen ist sehr begrenzt Reis-, Obst- und Gemüseanbau möglich.

Der größte Teil des Landes ist durch die beständige Wasserknappheit jedoch weitgehend ungenutzt. Da an eine künstliche Bewässerung, aufgrund der geringen Brunnenenergiebigkeiten (selten über 5 m³/h) kaum zu denken ist, können die landwirtschaftlichen Erträge nur durch eine optimale Nutzung der Anbaufläche während der kurzen Regenzeit gesteigert werden.

Projekte in diese Richtung sind im Gange, so z.B. der Bau kleiner höhenlinienparalleler Dämme, die sowohl der Erhöhung des Verhältnisses von Versickerung zu Oberflächenabfluß, als auch dem Erosionsschutz dienen. Eine punktuelle Aufforstung soll die jährlich stärker werdende Abschwemmung des Bodens hemmen und die zur Zeit mit durchschnittlich 15 km/Jahr nach S fortschreitende Ausdehnung der Wüste in diesem Gebiet verzögern.

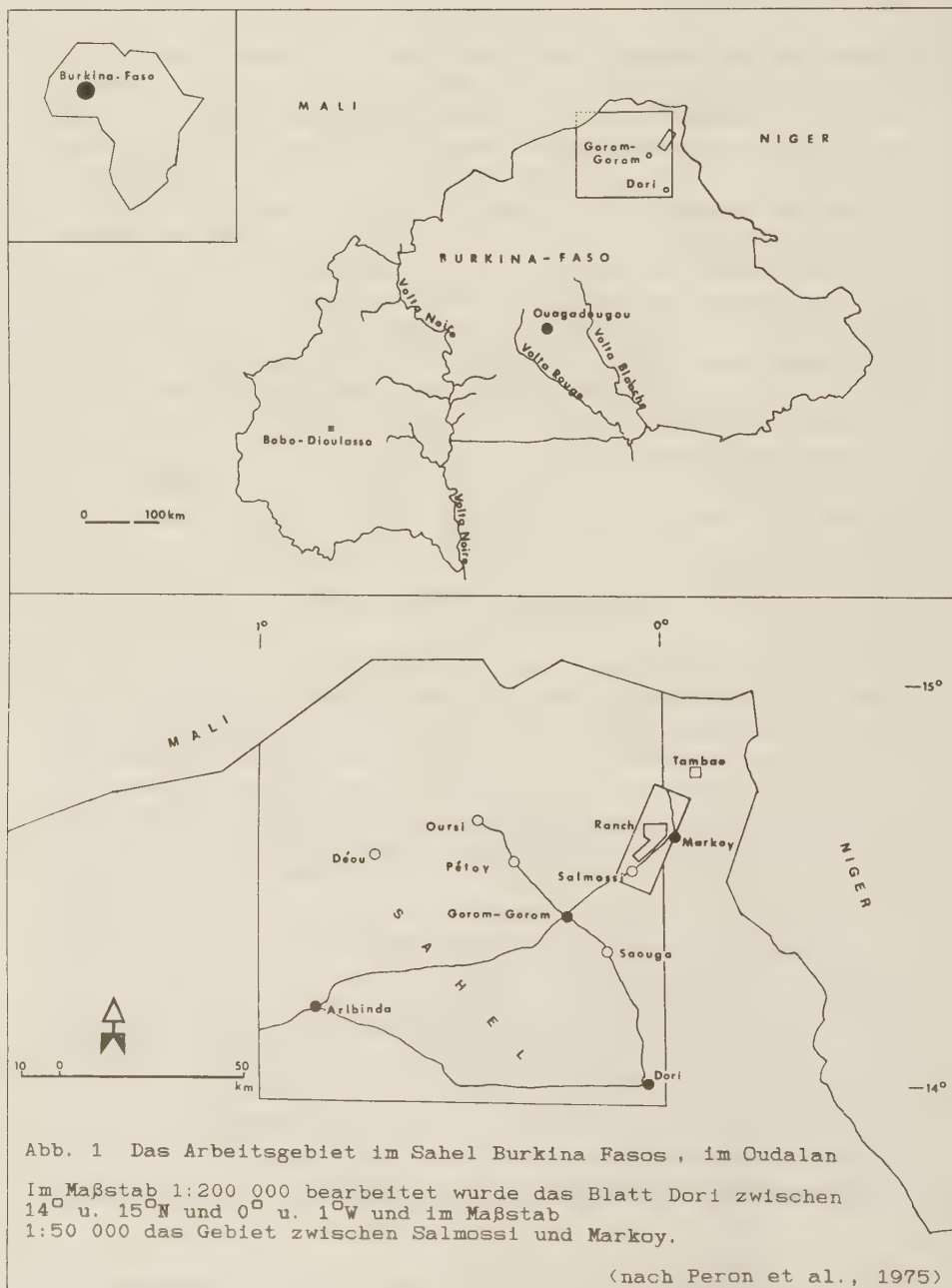


Abb. 1 Das Arbeitsgebiet im Sahel Burkina Fasos, im Oudalan

Im Maßstab 1:200 000 bearbeitet wurde das Blatt Dori zwischen 14° u. 15° N und 0° u. 1° W und im Maßstab 1:50 000 das Gebiet zwischen Salmossi und Markoy.

Diese rein ackerbaulichen Projekte werden von der vorwiegend viehzüchterisch orientierten Bevölkerung jedoch nur schwer angenommen. Immer mehr Nomaden kehren von den alljährlich während der Trockenzeit stattfindenden Wanderungen nach S nicht mehr in den Sahel zurück, so daß kleine Dörfer häufig ganz verlassen bleiben. Die größten Ansiedlungen sind die Departementhauptstadt Dori (6500 E) ganz im SE des ebenso genannten Kartenblattes, Gorom-Gorom etwa im Zentrum, Markoy im E, Aribinda im SW und Oursi im N (vgl. Abb 1).

1.2 Geomorphologie (nach Peron et al, 1979 u. IGN, 1960)

Burkina Faso weist nur geringe topographische Höhenunterschiede auf. Die größten Höhen liegen mit 750 m* im SW, an der Grenze zu Mali, die tiefsten Punkte (125 m) im SE, am Pendjari, dem Grenzfluß nach Dahomey. Über drei Viertel des Landes breitet sich eine Peneplain auf Höhen zwischen 250 m und 350 m, die von vereinzelt, einige 10 m hohen Kuppen oder Hügelgruppen unterbrochen wird. Die tiefer gelegenen, ausgedehnten flachen Gebiete entsprechen den seit dem Präkambrium der Erosion ausgesetzten Bereichen anstehenden Sockels, mit Graniten, Migmatiten und Gneisen. Die Erhebungen werden häufig von Quarziten und Metasedimenten gebildet. Inselberge sind meist Relikte nachtektonischer Intrusionen. Weit verbreitet sind auch Tafelberge als Reste einer Lateritdecke. Im SW Burkina Fasos wird die Peneplain von einem größeren, auf dem kristallinen Sockel auflagernden Sandsteinmassiv abgelöst, das die erwähnten höchsten Erhebungen beinhaltet.

Charakteristisch für das Arbeitsgebiet nördlich des 14. Breitengrades sind die EW-verlaufenden Dünengürtel. Die im S häufigeren Tafelberge, die die Ebene um ca 50 m überragen, treten im Oudalan eher selten auf. Weite Ebenen mit Graniten und Migmatiten des Präkambrium D werden von Massiven spät- oder nachtektonischer Granite, Syenite und Gabbros unterbrochen. Im W und E des Blattes Dori bilden die vulkanosedimentären Serien des Birrimien ausgedehnte Hügelketten, die aber 30 m Höhendifferenz kaum überschreiten. Der größte Teil des Arbeitsgebietes jedoch ist monoton eben.

(* Alle Höhenangaben beziehen sich auf das "Nivellement General de l'Afrique de l'Ouest")

1.3 Klima

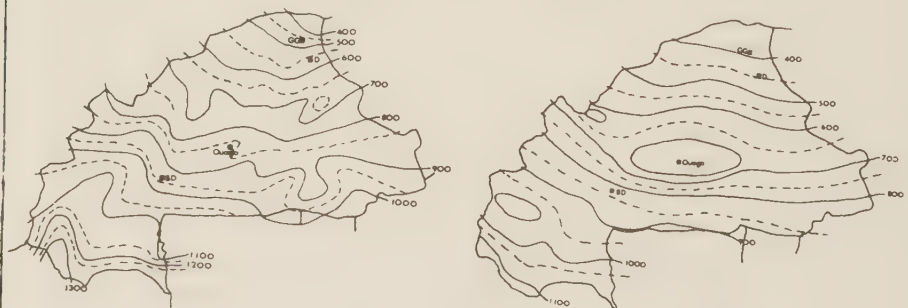
Während der größte Teil Burkinas zur Zone sudanesischen Klimas mit jährlich 2 Regenperioden im Mai/Juni und Juli bis Oktober gehört, muß das ganze Gebiet nördlich des 14. Grades nördlicher Breite dem Bereich des Sahelklimas mit nur einer Regenzeit von Juli bis Oktober zugerechnet werden.

1983 fielen in Dori an 34 Regentagen 356 mm, in Gorom-Gorom an 13 Tagen 220 mm und in Markoy 215 mm in 18 Tagen. Dies entspricht einem Niederschlagsdefizit von mehr als 30 % im Verhältnis zur Meßperiode 1971-1980. Die Isohyeten sind damit in den letzten 10 Jahren zwischen 100 km und 200 km nach S gewandert. Dieses fortschreitende Niederschlagsdefizit war schon im Vergleich der Meßdekaden 1961-1970 und 1971-1980 zu beobachten (Abb. 2) und kummulierte in der Dürrekatastrophe von 1970-1973.

Abb. 2 Mittlerer Jahresniederschlag in Burkina Faso in mm

der Meßperiode 1961-1970

der Meßperiode 1971-1980



(nach ASECNA, 1979 u. 1980)

GG = Gorom-Gorom D = Dori BD = Bobo Dioulasso

Ouaga = Ouagadougou

Die Niederschlagsmeßwerte der letzten 30 Jahre für die Station Markoy, direkt im Arbeitsgebiet, zeigen diese Tendenz im Einzelnen (Abb. 3). Die Gesamtniederschlagsmenge, vor allem aber die für die Grundwassererneuerung wichtige Zahl der Regentage geht zurück.

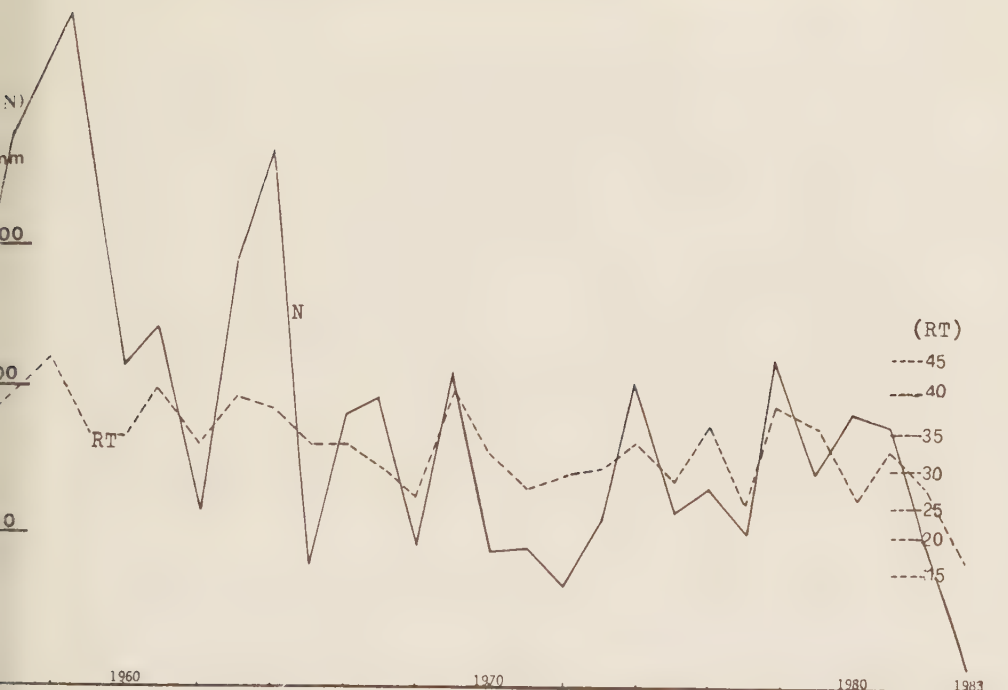


Abb. 3 Niederschlag (N) und Anzahl der Regentage (RT) für die Meßstation Markoy im Zeitraum 1955 - 1983 (nach ASEANA, 1966, 1970, 1980 und 1981 - 1984)

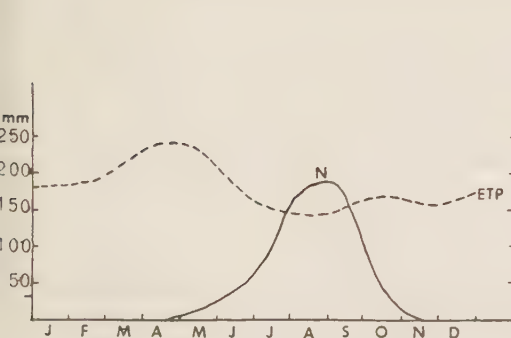


Abb. 4 Evapotranspiration (ETP) und Niederschlag (N) in Dori (aus Renard, 1973)

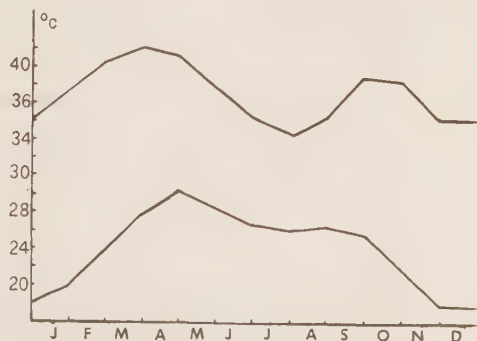


Abb. 5 Mittlere Maximal- u. Minimaltemperatur im Jahresgang in Dori (aus Renard, 1973)

Nur der Monat August erlaubt überhaupt eine Infiltration und Erneuerung der Grundwasserreserven. Alle anderen Monaten sind von wenigen Ausnahmen abgesehen niederschlagsfrei (Renard, 1973). Die Niederschlagswerte von 1984 übersteigen die des Vorjahres kaum. Eine Konzentration des Gesamtniederschlags auf weniger als 10 Regentage führte aber in einzelnen Gebieten zu katastrophalen Verwüstungen. In Gorom-Gorom fielen an einem Tag 2/3 des Jahresniederschlags. Neben enormen Erosionsschäden wurden dabei 1/3 der Lehmbauten zerstört.

Da das Infiltrationsvermögen, sowohl der geringmächtigen Sedimentbedeckung, als auch des Kluftwasserkörpers solchen kurzzeitig auftretenden, riesigen Wassermengen nicht gewachsen ist, floß der Großteil des Niederschlags oberflächlich ab, bzw. verdunstete rasch. Die Erneuerung der Grundwasserreserven blieb daher minimal. Die Ernteaussichten für 1984 waren durch den abgeschwemmten Boden und das damit fehlende Porenwasserspeichermedium als Anbaufläche sehr gering. (CILSS, 1984).

All diese Meßwerte geben nur Aufschluß über Niederschlag und Verdunstung im gesamten Sahel Burkina Fasos. Praktisch aber sind die gewitterartigen Niederschläge meist auf einige 10 km² große Flächen beschränkt. Die Isohyeten zwischen den Meßstationen sind daher nur als regionale Anhaltspunkte zu betrachten und für Wasserbilanzierungen ungeeignet.

Nach den Temperaturen lassen sich 2 wärmere und 2 kühlere Zeiträume abgrenzen (Abb. 5). Höchste Temperaturen bis 45°C werden im Mai gemessen. Zur Zeit der Niederschläge sinken die Temperaturen auf maximal 33°C und steigen danach wieder bis auf maximal 39°C an. Die täglichen Temperaturunterschiede können während der Trockenmonate 20°C leicht übersteigen. Während der Regenzeit sinken die täglichen Temperaturunterschiede durch die sonnenabschirmende Wirkung von Wolken und feuchten Luftschichten bis auf 10°C.

Eine Entwicklung in den Jahresmitteltemperaturen wurde bisher nicht untersucht. Es ist jedoch anzunehmen, daß durch die sinkende Zahl von Regentagen mit ihrer abschirmenden Wirkung durch Wolken das Temperaturtief während der Regenzeit (Abb. 5) weniger ausgeprägt und damit die Tendenz der Jahresmitteltemperatur ansteigend ist.

Im Sahel wird mit durchschnittlich 3500 Sonnenstunden/Jahr gerechnet. Die von der für die meteorologische Überwachung in Burkina zuständigen Behörde (ASECNA) für den Zeitraum 1971-1980 berechnete potentielle Evapotranspiration im Sahel beträgt 2300 mm/Jahr, also das sechsfache des gemessenen Jahresniederschlages. Selbst nach der Übersichtsformel von Turc (in: Gray, 1970) für die reelle Transpiration, die den Niederschlag berücksichtigt, verdunsten bei 446 mm Niederschlag und 28.8° Durchschnittstemperatur (1971-1980) in Dori 459 mm !

Der während 8 Monaten im Jahr aus NE wehende Wind, der Harmattan, beschleunigt die Austrocknung der oberflächennahen Bodenschichten.

1.4 Vegetation

Entsprechend den Klimazonen und den von S nach N abnehmenden Niederschlagsmengen verhalten sich auch Artenreichtum und Dichte der Vegetation. Während in den südlichsten Landesteilen die Feuchtsavanne mit einer dichten, immergrünen Vegetationsdecke vorherrscht, nimmt die Trockensavanne mit großem Anteil laubabwerfender Bäume und nach N zu immer lichterere Vegetationsbedeckung die mittleren Breiten des Landes ein.

Das Arbeitsgebiet gehört dem Sahel, dem Wüstenrandbereich, an. Es liegt dabei im Übergangsbereich von südlichem zu nördlichem Sahel, d.h. von Baum- und Strauchsavanne zu Dornbuschsavanne (Abb. 6, nach Barth, 1977).

Die wenigen, vorhandenen Bäume, vor allem Acacia-, Guiera-, Commiphora- und Balanitesarten konzentrieren sich auf die periodisch wasserführenden Trockentäler (frz.: marigot). Bei ausreichendem Grundwasserangebot können sie dort kleine, lichte Wäldchen entlang den Flußläufen bilden.

Außerhalb der Trockentäler treten Bäume an Hangfußbereichen von Schichtstufen, Lateritkuppen oder den meist morphologisch erhabenen, posttektonischen Granitintrusiva auf. Das Wurzelsystem der Gehölze kann hier tief in Gesteinsspalten eindringen und so vor der Verdunstung besser geschütztes Kluftwasser erfassen.

Eine beträchtliche Zahl abgestorbener Baobabs (*Adansonia digitata*) speziell bei diesen Standorten läßt eine langsame Klimaverschlechterung vermuten.

In den mit fluviatilen Sanden bedeckten Ebenen sind die wenigen größeren Bäume, vor allem bei einer Reihenanordnung, wie sie des öfteren auftritt, deutliche Kluftwasseranzeiger. Besonders geeignete Grundwasserindikatoren sind die phreatophyten *Myrtgyna inermis* und *Acacia albida* (Photo im Anhang), aber auch *Ficus guafalocarpa*, *Diopiros mespiliformis* und *Piliostigma reticulatum* (Terrible, 1975).

In den periodisch überfluteten Senkungsgebieten, den Maren, treten keine Holzgewächse auf. Zum Teil meterhohe Gräser herrschen auf diesen tonigen, stark verdichteten Böden vor. Dies sind bevorzugte Weideflächen, so daß diese Bereiche schon sehr früh in der Trockenzeit in Fernerkundungsaufnahmen vegetationslos erscheinen können.

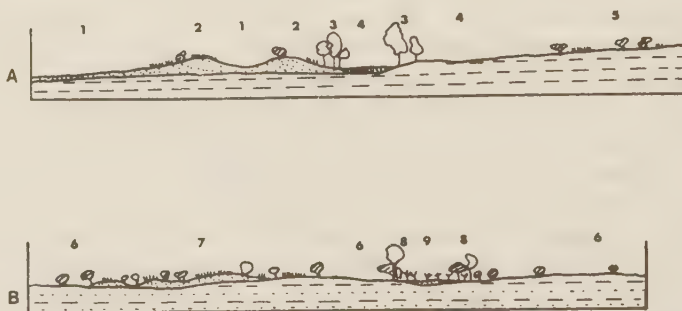


Abb. 6

(nach Barth, 1977)

Vegetationsprofile südsahelischer Vegetation in der Gondoebene (A) und nordsahelischer Vegetation bei In Tillit (B).

1-Anbaufläche (Hirse) in Dünenmulden; 2-Degradierete *Cenchrus-Aritida* Weide auf Dünenrücken (z.T. vegetationslos); 3-*Acacia*-Gehölz (*A-albida*, *A-seyal*); 4-Brachflächen, kahlgeweidet; 5-Degradierete Gras/Strauchbestände; 6-Nahezu vegetationslose Flächen auf schiefrigem Untergrund; 7-Flache Dünenbereiche mit *Cenchrus biflorus* und *Tragus*arten, vereinzelt *Boscia*- und *Acaciabüsche*; 7/8-Kontrahierte Vegetation mit *Acacia radiana*, *A-senegal*, *Balanites* und *Aristida mutabilis* in Flußniederungen.

Die Dünenbereiche sind häufig landwirtschaftlich genutzt, so daß die ursprüngliche Gliederung von grasbewachsenen Dünenkämmen und -hängen zur dichteren Dornbuschvegetation in den Dünentälern oft anthropogen verändert ist. Diese kleinen Tälchen mit höherem Tonanteil und besseren wasserstauenden Eigenschaften bieten die relativ günstigsten Bedingungen für den Hirseanbau. Die in den Fernerkundungsaufnahmen vereinzelt noch erkennbaren Buschvegetationsstreifen in den Dünentälchen sind meist abgeholzt und die grasbewachsenen Dünenkämme und -hänge abgeweidet (Bild 3). Außer den vegetationslosen Gebieten im Dünenbereich treten einige km^2 große Areale mit vollkommen abgestorbener Vegetation auf. So war z.B. im Jan. 1984 eine riesige Fläche nahe der Piste Petoy - Oursi mit dem Holz vertrockneter Büsche übersät. Ursache für diese zunächst nur punktuell auftretende Katastrophe ist vermutlich weniger das Niederschlagsdefizit der letzten Jahre allgemein, sondern eher ein punktuell, auf einige km^2 beschränktes, vollkommenes Ausbleiben jeglichen Niederschlags.

Eine Zusammenstellung der häufigsten Pflanzen im Arbeitsgebiet, sowie eine Skizze der Pflanzenbestimmungspunkte findet sich im Anhang (Terrible, 1975).

1.5 Wasserbedarf

Auf der Konferenz über die Wasserversorgung in den Dörfern Westafrikas, die im Januar 1983 in Ouagadougou stattfand, wurden die mittelfristigen Ziele definiert. So sollen in den nächsten Jahren pro Person und Tag 10 l, pro Rind 30 l und pro Ziege 7 l Wasser zur Verfügung stehen. Für eine durchschnittlich 8-köpfige Familie mit 2 Rindern und Kleinvieh ergibt diese Forderung ca 190 l/Tag, für ein mittleres Dorf mit 50 Familien also 9500 l Wasser pro Tag. Da im Sahel sinnvollerweise hauptsächlich Handpumpen verwendet werden, können pro Brunnen kaum mehr als $0,4 \text{ m}^3/\text{h}$, bei täglich 10 Stunden Entnahme also maximal 4 m^3 gefördert werden. Das mittlere Dorf mit 50 Familien benötigt also bereits 3 Brunnen mit einer ganzjährig anhalten Ergiebigkeit von $0,4 \text{ m}^3/\text{h}$. Diese Ziele sind bei weitem nicht erreicht. Viele der bestehenden Brunnen fallen mehrere Monate lang ganz trocken; andere erbringen langfristig nur geringere Ergiebigkeiten.

Pumpversuche des BRGM (1983) bei 162 neugebohrten Brunnen ergaben nach 6 Stunden anhaltender Entnahme nur noch 5 % der ursprünglichen Ergiebigkeit.

Da 80 % der produktiven Brunnen im Sahel selbst kurzfristig unter $5 \text{ m}^3/\text{h}$ und 35 % unter $1 \text{ m}^3/\text{h}$ liefern, ergeben bei beständiger Entnahme nur sehr wenige Brunnen mehr als die geforderten $0,4 \text{ m}^3/\text{h}$.

Ein weiteres Ziel ist die Verkürzung der Laufstrecken zum nächstgelegenen Brunnen. Behördliche Erhebungen haben durchschnittliche Entfernungen Wohnort-Wasserstelle von 1 km ergeben.

Um zumindest den bisherigen Stand zu erhalten oder sogar diesen Zielen etwas näher zu kommen, werden z.Zt. von nationaler Seite, aber auch von verschiedenen internationalen Organisationen, Grundwasserprospektionen im Sahel und in ganz Burkina Faso durchgeführt. Erfahrungsgemäß bleibt jedoch die Zahl der tatsächlich gebohrten Brunnen und vor allem die Zahl der neugebohrten, wirklich ergiebigen Brunnen hinter den Forderungen zurück.

Die bestehende Prospektionsmethodik muß daher verbessert und auf die Erschließung ergiebigerer und erneuerbarer Grundwasserreserven konzentriert werden.

2. Geologischer Rahmen

2.1 Überblick über die Geologie von Burkina Faso

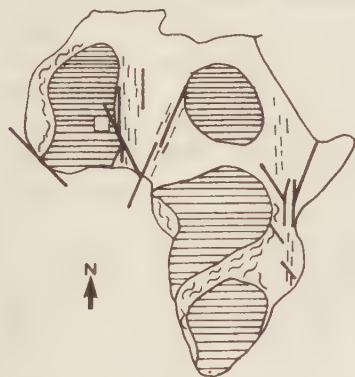


Abb. 7 Die Kratone Afrikas nach Rocci (1966) aus UNESCO (1976) mit Faltungszonen (~~~~) und Hauptlineamenten (//)

Burkina Faso liegt im zentralen und südlichen Bereich des westafrikanischen Sockels (Abb. 7) auf dem sogenannten Baoule-Mossi Block. Mehr als 80 % des Untergrundes bestehen aus den kristallinen Serien des Präkambrium D und C. Nur an der N-, NW- und E-Grenze des Landes stehen sedimentäre Einheiten des Infrakambriums und Präkambriums A an.

Lange Zeit und zum Teil auch heute noch bereitete eine einheitliche Gliederung und Nomenklatur Schwierigkeiten. Besonders die hochmetamorphen Serien des Präkambrium ließen sich zeitlich kaum einordnen. Erst nach radiometrischen Altersbestimmungen erfolgte eine Unterteilung des westafrikanischen Sockels durch Daumain und Furon (1960) in 4 zeitliche Abschnitte:

Präkambrium I	600 - 1000 Mio Jahre
Präkambrium II	1000 - 2000 Mio Jahre
Präkambrium III	2000 - 3000 Mio Jahre
Präkambrium IV	älter als 3000 Mio Jahre

Eine weitere der zahlreichen anderen Einteilungen nach Marcellin (1971) in oberes, mittleres und unteres Präkambrium sei hier nur am Rande erwähnt.

Mit der späteren Gliederung in Präkambrium A, B, C und D kam man wieder von der Einordnung nach absoluten Altersangaben ab und beschränkte sich darauf, die relativen Stellungen der regionalen Abfolgen zueinander zu beschreiben.

Im Folgenden soll ausschließlich die stratigraphische Einteilung der geologischen Karte von Obervolta 1 : 1 Mio (Hottin u. Quedraogo, 1975) bzw. die der geologischen Karte des Oudalan (Delfour Jeambrun, 1970) verwendet werden:

Infrakambrium

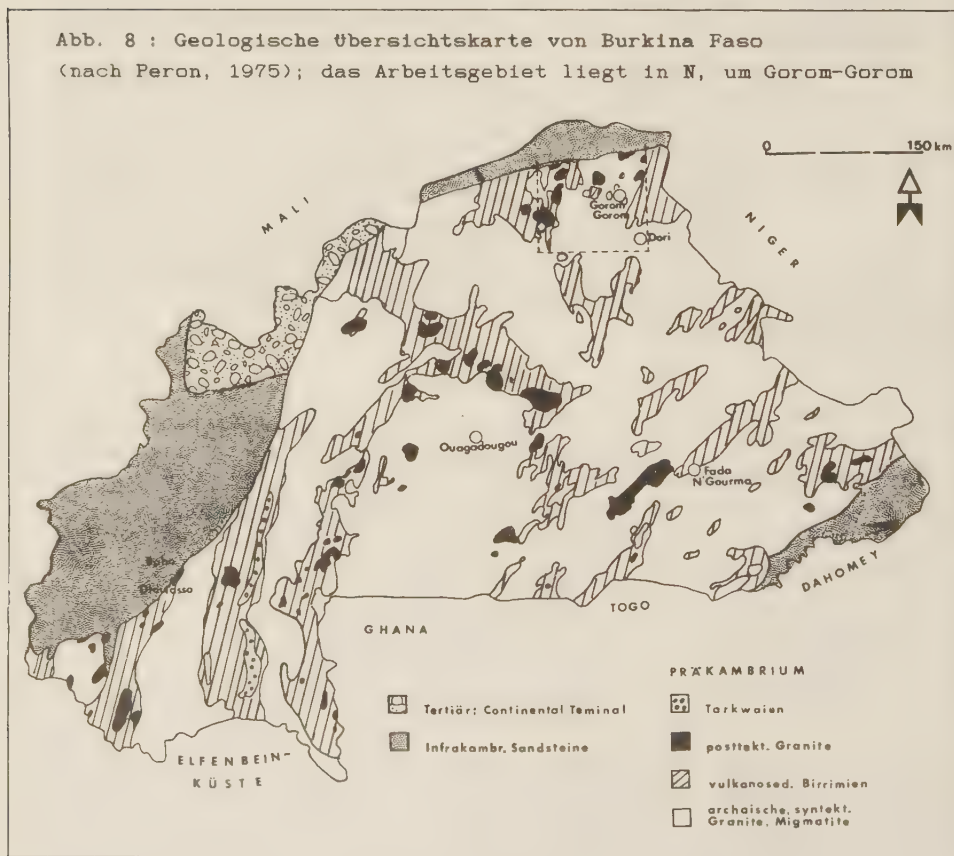
Präkambrium A 500 - 1400 Mio Jahre

Präkambrium B fehlt

Präkambrium C 1700 - 2400 Mio Jahre

Präkambrium D über 2400 Mio Jahre

Abb. 8 : Geologische Übersichtskarte von Burkina Faso
(nach Peron, 1975); das Arbeitsgebiet liegt in N, um Gorom-Gorom



Wie bereits erwähnt gehört fast ganz Burkina Faso den Einheiten des Präkambrium D und C an, wobei das Präkambrium D (oder Antebirimien) in Form riesiger, granitischer oder migmatitischer Kerne den Hauptteil einnimmt. Vor 2700 Mio Jahren unterlagen diese Kerne, während der liberianischen Orogenese einer Faltung und z.T. einer Metamorphose.

Zwischen diesen Kernen bilden die vulkanosedimentären Einheiten des Präkambrium C (oder Birrimien) einige 10 km breite und einige 100 km lange Streifen, die den weniger erodierten Relikten intrakratonischer Grabenfüllungen entsprechen.

Der liberianische Sockel unterlag dann vor 2000 Mio Jahren zusammen mit den prätektonischen Serien des Birrimien während der Eburneenne-Orogenese einer weiteren Faltung. Dabei wurden die vulkanosedimentären Einheiten des Birrimien, wie auch die granitischen, migmatitischen und metamorphisierten Serien des Antebirimien von syn- und spätektonischen Granitintrusionen durchbrochen.

Nachtektonische, alkalische Granitintrusionen beendeten das Präkambrium C.

Aus dem Präkambrium B finden sich in Burkina, wie auf dem ganzen westafrikanischen Kraton keine Hinweise.

Die sedimentäre Bedeckung des Präkambrium A und Infrakambrium tritt nur noch entlang der N- und NW-Grenze nach Mali zu im Taoudeni-Becken und im SE des Landes am Rand des Volta-Beckens auf. Diese hauptsächlich aus Sandsteinen bestehenden Folgen lagern diskordant auf dem kristallinen Sockel. Der Faziesvergleich beider Becken spricht zumindest für eine zeitweilige Überflutung des zu dieser Zeit bereits weitgehend eingeebneten Kratons auch im zentralen Burkina.

Terrestrische, tertiäre Sedimente überlagern die infrakambrischen Abfolgen wiederum diskordant. Weitere Relikte tertiärer Oberflächen sind die regional unterschiedlich häufigen Lateritkuppen. E-W verlaufende, einige 100 km lange Dünengürtel in N-Burkina gehören zu den jüngsten geologisch kartierbaren Einheiten. Ihre steilen Hänge an den N-Seiten weisen auf Windrichtungen aus S während der Dünenbildung hin. Heute sind auch diese Dünen bereits auf dem Weg der Erosion und liefern einen Teil des Sandes, der die weiten Ebenen des Oudalan bedeckt.

2.2 Tektonische Entwicklung in Burkina Faso

Spuren der ältesten bekannten, der liberianischen Orogenese vor 2700 Mio Jahren sind nur selten nachweisbar. Trotzdem lassen sich in den Gebieten mit feinerer Untergliederung des Antebirrimien Strukturen erkennen, die deutlich älter, als die der Birrimienphase sind (z.B. komplizierte Falten in den Gneisen im Oudalan; E-W Strukturen in den Graniten nördlich Fada N'Gourma).

Wesentlich detaillierter sind die Informationen über die Eburneenne Orogenese. Eingeleitet wurde sie mit Bruchbildungen in 2 deutlichen Hauptrichtungen (25° - 45° und 100° - 120°). Vulkanite extrudierten in diesem Bruchsystem. Später wurden diese Gräben durch ihre anhaltende Absenkung Ablagerungsraum der vulkanosedimentären Birrimienserien mit regional unterschiedlichen Faziesräumen. Der vulkanosedimentäre Zyklus wurde mit einer Faltung und Granodiorit- und Tonalitin intrusionen abgeschlossen (Hottin, Quedraogo, 1975).

Die Birrimien-Hauptfaltung, begleitet von starken syn-, spät- und nachtektonischen Magmatitin intrusionen erfolgte vor 2100 Mio bis 1950 Mio Jahren. Dabei wurden die älteren, vulkanosedimentären Birrimienserien stark gefaltet und mit Teilen der Antebirrimienserien epizonal überprägt. Nach Hottin, Quedraogo (1975) läßt sich diese zweite orogene Phase mit der Entwicklung der Grünschiefergürtel im südlichen Afrika vergleichen (Hunter, 1974; Coward und James, 1974).

Nach Ende der Eburneenne Orogenese vor ca 1700 Mio Jahren wurde Burkina nur noch in seinen nordöstlichsten Teilen, in den sedimentären Serien des Präkambrium A und Infrakambrium von der panafrikanischen Orogenese (ab 550 Mio Jahre) betroffen.

Die zeitliche Einordnung der Doleritin intrusionen ist nicht vollkommen geklärt. In den infrakambrischen Sedimenten an der W-Grenze sind diese Dolerite permischen Alters. Die Doleritgänge in den präkambrischen Serien mit NNW- und WNW-Richtungen sind vermutlich älter (Hottin, Quedraogo, 1975).

3. Geologische Übersicht über den Oudalan

3.1 Bisherige Arbeiten

Trotz seiner relativ schwierigen Erreichbarkeit ist der Oudalan überraschend früh und häufig geologisch bearbeitet worden. Erste geologische Untersuchungen wurden bereits 1910 von Chudeau in seiner "Note sur la geologie du Soudan" veröffentlicht. 1926 erschien die erste geologische Karte von Hubert, dem Gründer des geologischen Dienstes in Westafrika. Er unterschied in seiner Karte "kristalline Schiefer, Glimmerschiefer mit wesentlich weniger Quarzanteil, granitische Intrusiv- und basische Eruptivgesteine". Die relative zeitliche Abfolge war noch unklar. In den folgenden Jahren galt das geologische Interesse mehr den südlichen Bereichen auf dem westafrikanischen Sockel. Erst 1945 beschäftigte sich Roques in seiner sehr ausführlichen Arbeit über die Serien des Nigerbogens wieder mit dem Oudalan. Er unterteilte dabei insbesondere die vulkanosedimentären Birrimieneinheiten in die "Serien von Ansongo, von Labbezenga und die von Yatahala". Bodin (1951) griff die Idee von Roques (1945) auf und führte die Unterteilung in syn- und posttektonische Granite des Birrimien ein. Kriterium für diese Unterteilung war ausschließlich die Lagerung. Der bereits von Roques (1945) geschaffene Begriff einer "granitisch-schiefrigen Textur" erst ließ diese Differenzierung in syntektonisch-"konkordante" (granites baoules) und posttektonisch-"diskordante" (granites type Bondoukou) Granite zu. Delforme (1951) differenzierte den Granit von Liptako in einen posttektonischen alkalischen und 2 verschiedene basische Typen. Die sedimentäre Abfolge im N nannte er nach dem dortigen Fluß die "Beli-Serie", da er sich über die wesentlich größere Ausdehnung dieser Serie noch nicht im Klaren war. Die umfangreichste und wohl detaillierteste Arbeit über dieses Gebiet veröffentlichte Ducellier (1963). Seine Gesteinsbeschreibungen sind exakter, als die aller jüngeren Arbeiten. Eine große Zahl mikroskopischer Schliffbilder gehören ebenso dazu, wie die Ergebnisse chemischer Analysen, so daß bei allen Gesteinsbeschreibungen getrost auf diese Arbeit verwiesen werden kann. Herausgegeben von Defossez (1958) erschien darin die geologische Übersichtskarte 1 : 500 000, die auch heute noch als Grundlage

1970 erschien die "geologische Karte des Oudalan" im Maßstab 1 : 200 000 (Delfour, Jeambrun, 1970), die neben den beiden Autoren auch von Gravost und Reichelt mitbearbeitet wurde. In dieser Karte wurden zum ersten Mal auch Interpretationen von Luftbildern im Maßstab 1 : 50 000 mitverwendet. Die lithologischen Einheiten in dieser Karte sind erstaunlich genau auskartiert. Es ist fragwürdig, ob die geologischen Grenzen innerhalb des Präkambrium D in den weiten sandbedeckten Ebenen mit nur sehr spärlichen Aufschlüssen wirklich so exakt aufzunehmen sind. Selbst mit dieser geologischen Karte bereitet es große Schwierigkeiten die kartierten Serien des Präkambrium D zu finden, geschweige denn ihre genauen Grenzen festzulegen. Relativ leicht verifizierbar im Gelände dagegen sind die spät- und nachtektonischen Serien des Birrimien.

Neben diesen allgemein-geologischen Arbeiten erschien in den letzten 20 Jahren noch eine größere Zahl von Veröffentlichungen, die sich mit speziellen Problemen befassten. Dazu gehören die lagerstättenkundlichen Arbeiten über Mn-Vorkommen in Tambao, über Fe- und V-Vorkommen in den Gabbros von Tin Edia westlich von Oursi und über Graphitvorkommen in den Birrimienabfolgen. Diese Berichte sind vom "Bureau voltaique de la geologie et des mines" (BUVOGMI, heute BUMIGEB) verfasst.

Weitere Berichte und Veröffentlichungen der "Direktion de l'hydraulique et de l'equipement rurale" (HER), des "Comite interafricaine d'etudes hydrauliques" (CIEH), des BRGM, von ORSTOM, der FAO und einigen privaten Ingenieurbüros befassen sich mit den hydrogeologischen Problemen in diesem Gebiet.

ORSTOM unterhält eine klimatologische Meß- und Versuchsstation nahe Oursi, in der Verdunstungs- und Infiltrationsmessungen durchgeführt werden.

1977 ließ die kanadische "Organisation für internationale Entwicklung" eine aeromagnetische Aufnahme mit Karten im Maßstab 1 : 200 000 und 1 : 50 000 durchführen (Terra Surveys, 1977).

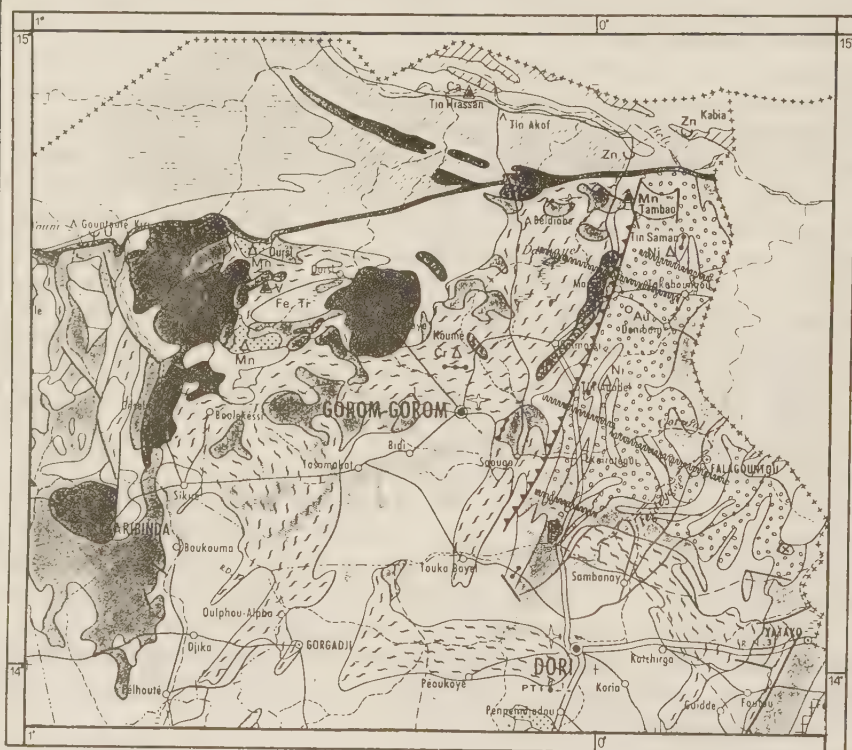
Diese Karten dienten in erster Linie der lagerstättenkundlichen Prospektion. Die FAO (Astier, 1981) leitete jedoch auch hydrogeologische Aussagen aus den Interpretationen dieser Karten ab.

Von den umfassenderen, neueren Arbeiten, deren Ergebnisse sich auch auf das Departement Sahel beziehen, sind die geologische Karte 1 : 1 Mio der Republik Obervolta (Hottin, Ouedraogo, 1975) und die "Multidisziplinären Untersuchungen von Satellitenbildern

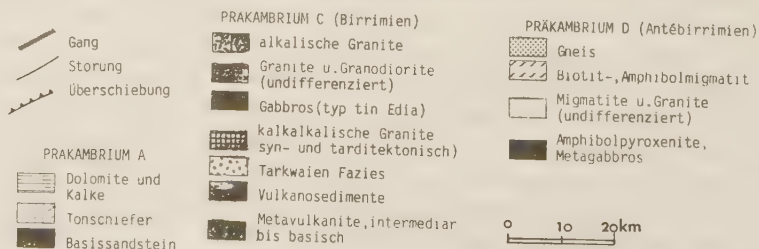
der Republik Obervolta" (Bannert et al., 1980) besonders erwähnenswert.

Weitere spezielle Veröffentlichungen über Klima, Vegetation und Grundwasserbohrungen sind in den entsprechenden Kapiteln zitiert.

Abb. 10 Geologische Übersichtskarte des Oudalan



aus: Geologische Karte der Republik Obervolta, 1:1 Mio. G. Hottin und O. F. Ouedraogo (1975)



3.2 Geologische Entwicklung

Das Gebiet um Gorom-Gorom (Abb. 10) besteht hauptsächlich aus den Serien des Präkambrium D (undifferenzierte Granite und Migmatite, Biotit- und Amphibolitmigmatite). Westlich einer NS-Linie bei Sikire und östlich der Linie Saouga - Tin Agadel, wird dieser Antebirrimienblock von Gesteinen des Präkambrium C begrenzt. Sowohl die Serien des Antebirrimien, wie die des Birrimien sind von spät- und nachtektonischen Graniten, wie bei Aribinda oder Petoy durchdrungen. Nördlich von Oursi taucht dieser Sockel auf seiner gesamten Breite unter die sedimentären Abfolgen des Präkambrium A ab.

3.2.1 Das Antebirrimien (Präkambrium D)

Wie bereits erwähnt, lassen sich im Antebirrimien des Oudalan Strukturen der liberianischen Orogenese nachweisen. Im Gegensatz zu weiten Teilen Burkinas weist das Präkambrium D hier nicht nur Granite und Migmatite des ursprünglichen Kratons, sondern auch die vulkanosedimentären Einheiten von Gouba und Sikiday auf. Delfour und Jeambrun (1970) unterscheiden kalkalkalische Granite, Orthogneise und Migmatite, Biotitgneise, Leptite. Davon getrennt wird die Formation von Sikiday mit ophiolithischen Ergußgesteinen (Peridotit, Diorit, Dolerit). Die Formation von Gouba entspricht der auf die ophiolithische Phase folgenden Flyschfazies, hauptsächlich mit Muskovit-, Sillimanit- und Mangan-Quarziten. Nach einer mesozonalen Metamorphose sind diese Serien in verschiedenen Richtungen - im Allgemeinen diskordant zur späteren Birrimienphase - gefaltet worden. Der Geosynklinalraum läßt sich anhand der vulkanosedimentären Abfolgen als liegendes "S" zwischen Gouba im W und Saouga im E ableiten. Weiter im Süden, um den 14. Breitengrad, sind die vulkanosedimentären Birrimienserien wesentlich stärker von der Birrimienorogenese überprägt, so daß die primären Strukturen nicht mehr erkennbar sind. Diese ursprünglich mesozonalen Serien sind dort im Birrimien epizonal retrograd metamorphisiert.

3.2.2 Das Präkambrium C

Delfour und Jeambrun (1970) unterscheiden im Präkambrium C die vulkanosedimentären Serien des Birrimien von den syn-, spät- und nachtektonischen Intrusivgesteinen.

Das Birrimien tritt in 2 großen Synklinorien auf, mit NS-Achse bei Aribinda und mit NNE-Achse östlich von Saouga. Diese Synklinorien begrenzen den Sockel des Antebirrimien im E und W. Das westliche -aus 2 kleineren Synklinalen zusammengesetzt- weist epimetamorph überprägt die gesamte geosynklinale Abfolge des unteren Birrimien von Rhyolithen und Metavulkaniten bis zur Flyschfazies auf. Die spätgeosynklinalen Molassesedimente fehlen in dem westlichen Synklinorium ganz.

Im östlichen Synklinorium dagegen bilden die überprägten Molassesedimente den Hauptteil der dort heute anstehenden Serien und bedecken teils das untere Birrimien, teils lagern sie dem Antebirrimien direkt auf. Dieses ursprünglich breitere Synklinorium ist an seiner Westseite, an der NNE streichenden, nach WNW-einfallenden Markoy-Störung vom Antebirrimienblock teilweise überschoben.

Sowohl das Antebirrimien, wie auch das vulkanosedimentäre Birrimien sind von granitischen und gabbroiden Intrusionen durchbrochen. Diese rötlichen, meist grobkörnigen, alkalischen Granite stehen meist als Inselberge mit Wollsack-Verwitterungsformen an. WNW-gerichtete doleritische Gänge beschließen das Präkambrium C.

3.2.3 Das Präkambrium A und Infrakambrium

Beginnend mit einem Basissandstein überlagert das Präkambrium A nördlich einer E-W Linie bei 14°50' diskordant alle älteren Serien. Von 5 nach Reichelt (in: Delfour, Jeambrun, 1970) unterschiedenen sedimentären Einheiten treten in Burkina nur die beiden stratigraphisch tiefsten auf. Trotzdem lassen sich von S nach N, vom Beckenrand zum Zentrum hin, verschiedene Faziestypen unterscheiden.

In einer letzten tektonischen Phase ist dieses Becken zu NW-SE streichenden Sätteln und Mulden aufgefaltet worden.

3.2.4 Tertiär und Quartär

Besonders im W des Arbeitsgebietes auftretende, 30 m bis 50 m hoch herausragende Lateritkuppen sind die Relikte eines feucht-heißen Klimas im Tertiär.

Jüngste Zeugen der geologischen Entwicklung dieses Gebietes sind die jetzt ortsfesten, einige 100 km EW-erstreckten Dünergürtel. Sie schneiden ein älteres Entwässerungsnetz und stauen so einige, jahreszeitlich unterschiedlich große Seen, die "Mare", auf.

3.3 Strukturen

Auch im Oudalan lassen sich die Störungssysteme und Kluftrichtungen mehreren Orogenesen zuordnen und z. T. in eine zeitliche Abfolge bringen. Die Strukturen des Präkambrium D, mit der liberianischen Orogenese sind im Oudalan durch die feinere Untergliederung der Serien besser als im übrigen Burkina erkennbar. Nahe den im Birrimien aktiven Grabenbereichen sind diese Strukturen überprägt. Auf dem großen Antebirrimiensockel lassen sich aber aus der Längserstreckung der vulkanosedimentären Antebirrimieneinheiten noch tendenziell Richtungen erkennen.

Nördlich von Gouba ist eine NE-Erstreckung dieser Serien vorherrschend, bei Quaire eine SE-Richtung und nördlich von Saouga dann wieder eine NE-Richtung (Delfour, Jeambrun, 1970).

Bei Gorgadji, weiter im S, erstrecken sich Orthoamphibolite ebenfalls in NE-Richtung. Die Strukturen dort sind aber eher der Birrimienphase zuzurechnen, die in ihren beiden großen Geosynklinalen Serien des Antebirrimien mitgefaltet hat (vgl. Abb. 10).

Die Eburneenne Orogenese erzeugte Achsenrichtungen zwischen N und NNE, wie die Erstreckungen der beiden Synklinorien zeigen. Die b-Achsen kleinerer Mulden und Sättel innerhalb dieser Synklinorien können lokal von diesen Richtungen abweichen.

Der Westrand der östlichen Birrimiengeosynklinalen wird von der ca 25° streichenden, nach WNW einfallenden, über knapp 100 km verfolgbaren Markoy-Überschiebungsbahn gebildet. Die einengende Druckrichtung während der frühen Eburneenne Orogenese aus SE kann daher als sicher angenommen werden.

Die spät- und nachtektonischen Granite und Gabbros des oberen Präkambrium C verdanken ihre Entstehung wohl verschiedenen tektonischen Phasen.

Die vermutlich spättektonischen alkalischen Granite bei Deou, westlich von Oursi, scheinen von ihrer Lage der ausgehenden Birrimienphase anzugehören. Zahlreiche jüngere Bruchbildungen haben dieses Massiv in sich zerschert und grenzen es von jüngeren und älteren Einheiten ab.

Ein weiteres Massiv dieser Granite zwischen Lilengo, Salmossi und Markoy (Abb. 10) weist eine deutlich NNE-Erstreckung (30 km Länge, 4 km Breite) auf. Eine in diesem Massiv enthaltenen mikrogranitische Verfüllung unterstreicht diese Richtung.

Die sonstigen kleineren Vorkommen spättektonischer Granite auf einer Linie im N von Gorom-Gorom zeigen NW-Erstreckungen.

Diese kleineren Vorkommen, wie auch das letztgenannte Massiv grenzen sich kaum durch deutliche tektonische Strukturen von den umgebenden Antebirrimieneinheiten ab. Durch ihre Lage und Richtung parallel zu den ophiolithischen Antebirrimienserien weisen sie auf eine Intrusion in oder nahe der bereits im Präkambrium D angelegten geosynklinalen Schwächezonen hin.

Drei weitere spättektonische Massivs werden von den "undifferenzierten Graniten und Granodioriten" (Hottin, Ouedraogo, 1975) gebildet (Abb. 10). Zwei davon, das von Aribinda und das von Petoy, lassen durch ihren nahezu runden Umriss keinerlei Aussage über eine tektonisch bedingte Anlage zu. Das dritte bei Guessel-nay begrenzt die westliche der Birrimien-synklinalen und verdankt ihr wohl seine NS-Erstreckung.

Für das Ende des Präkambrium C lassen die besonders im E-Teil des Oudalan auftretenden Dolerit- und Gabbrogänge WNW-Bruchrichtungen erkennen. Diese 20 m - 50 m breiten Gänge erreichen bis 35 km Länge (nördlich Markoy). Oft treten sie als Gruppen mehrerer paralleler, teilweise unterbrochener Dykes auf. Ihre Entstehung kann der auf die Birrimien-Orogenese folgenden Entspannungsphase zugerechnet werden, weil sich im Gegensatz zu den NNE-gerichteten Doleritgängen im W Burkinas keine Fortsetzung in den infrakambrischen Serien erkennen lässt.

Die Sedimente des Infrakambriums im N zeigen ein Sattel- und Muldensystem mit NW-gerichteten b-Achsen. Dieses System ist auf eine Einengung des großen infrakambrischen Sedimentationsraumes zwischen den beiden präkambrischen Blöcken von Burkina und dem Niger im SW und dem Hoggar im NE zurückzuführen (vgl. Abb.7).

Dieses Falten-System wiederum ist durch ein jüngeres NE-gerichtetes Bruchsystem gekappt.

Zahlreiche kleinere Störungen und weitere Bruchrichtungen werden bei der Lineamentinterpretation beschrieben.

3.4 Zusammenfassung des Präkambrium im Oudalan

Tab. 1:

orogene Ereignisse		Lithologie		Stressfelder Strukturen	
Präkambrium A	Pan-African, Orogenese	Faltung	Kaife, Dolomite Tonschiefer		b-Achsen (NW) in den Infrakam, Serien jüngere Querbrüche
		Diskordanz	Basissandstein		
		Metamorphose (Grauschiefer Fazies)	Dolerite in Dykes posttekt.kalk-alkal. Granite Gabbros spätktekt.alkal. Granite		
Präkambrium C	Oberes Birrimien	Geosynklinalstadium	Konglomerate u. Quarzite der Tarkwaian-Molasse		Streichrichtung der Doleritdykes
		Diskordanz			Streichrichtung der Markoy-Überschiebungsbahn
Präkambrium D	Unteres Birrimien	Geosynklinalstadium	Grauwacken Quarzite Metavulkanite		b-Achsenrichtung der Birrimiengräben
		Intrakratone Grabenbildung Metamorphose (Amphibolith Fazies)	Rhyolithe Quarzite Dolerite Metagabbros Gneis		Längsstreckungen der ophiolithischen und vulkanosedimentären Formationen
		Geosynklinalstadium Granitisierung des Kratons	Migmatite kalk-alkal. Granite		

Infrakambrium

4550

4150

42100

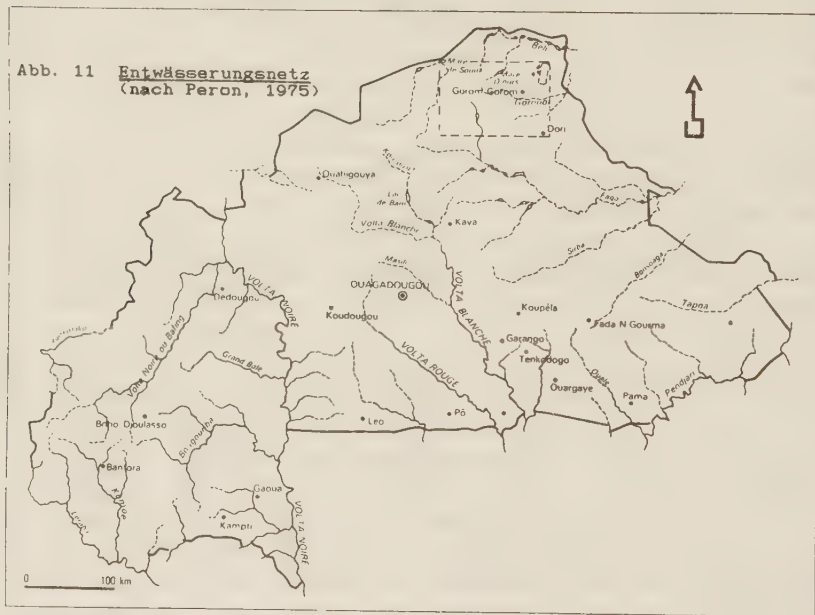
42700

Mio Jahre

4. Hydrogeologie

4.1 Einführung, Übersicht

Das Kapitel 1.3 hat gezeigt, daß Burkina zu den klimatisch wenig begünstigten Ländern gehört. Die geologischen Verhältnisse - das weitgehende Fehlen größerer und ausreichend mächtiger Porenwasserspeicher - verschärfen den permanenten Wassermangel. Lediglich 3 Flüsse, der Volta-noire, der Komoe und der Leraba im SW des Landes führen ganzjährig Wasser.



Der ganze Zentral- und Westteil des Landes gehört den Entwässerungssystemen der 3 Volta-Flüsse (-noire, -rouge, -blanche) mit Abflußrichtungen nach S an, wobei aus landwirtschaftlicher Sicht dem Volta-noire die größte Bedeutung zukommt. Die Flüsse im E und N des Landes gehören dem System des Niger an.

Die Abflußrichtung im Arbeitsgebiet im Norden des Landes ist vorwiegend NNE zum Beli hin, der 70 km östlich der Landesgrenze ebenfalls in den Niger mündet.

Die Flußläufe im Sahel liegen den größten Teil des Jahres trocken. Lediglich einige Stunden oder wenige Tage nach besonders starken Niederschlägen in der Regenzeit ist der Begriff "Fluß" gerechtfertigt. Diese Flüsse werden an den E-W-erstreckten, ausgedehnten Düngürteln aufgestaut und bilden die zahlreichen Mare (*).

Die bedeutendsten dieser Mare sind die bei Oursi, Markoy, Darkoy, Kissi, Yamboli und Kouyera.

Sie bieten nahezu die einzige Möglichkeit für eine Bewässerung im Sahel Burkinas und zum punktuellen Anbau von Obst und Gemüse.

Stauseen wie sie im Zentrum und Süden des Landes häufig sind, existieren nicht. Der Wasserbedarf im Sahel muß also fast ausschließlich aus Grundwasser gedeckt werden.

4.2 Grundwasser im Sahel Burkinas

Die kristallinen Serien und die meist nur geringmächtige Sandbedeckung im Sahel Burkinas weisen grundsätzlich nur ein sehr begrenztes Wasserspeichervermögen auf.

Für die Grundwasserprospektion können 3 sehr verschiedene, potentielle Bohrziele unterschieden werden:

1. die Alluvionen in den Trockentälern
2. die Verwitterungszone des kristallinen Grundgebirges
(aus dem frz. auch: Alteritzzone),
3. die offenen Klüfte und Spalten im kristallinen Grundgebirge

(*) Der Begriff "mare" (frz.: Pfütze) ist hier für die jahreszeitlich oder ganzjährig wasserführenden, von Dünen aufgestauten, flachen Tümpel und Seen verwendet.

4.2.1 Alluvionen

Da im Sahel Burkinas kein Fluß ganzjährig Wasser führt, beschränkt sich der Sedimenttransport auf die kurze Zeit nach den wolkenbruchartigen Niederschlägen. Die Erosionswirkung während dieser Zeit ist verheerend, die Transportweiten der Sedimente jedoch nur kurz. Eine Sortierung nach Korngrößen existiert durch den enormen, aber sehr kurzzeitigen Abfluß kaum. Bis 10 cm große, kantige Gesteinsbrocken können in einer tonigen Matrix vorkommen. Dieses heterogene Sediment ist meist nur geringmächtig (bis 8 m). Reine Kies- oder Sandfraktionen innerhalb dieser Alluvionen erreichen selten und mit nur geringer räumlicher Ausdehnung 1 m Mächtigkeit oder mehr. Die Permeabilität bleibt so ebenfalls gering. Von den wenigen Ausnahmen abgesehen, bei denen die rein sandig-kiesigen Fraktionen einige 10 m Mächtigkeit erreichen ist dieser Aquifertyp für eine permanente Wasserentnahme unzureichend. Traditionell gegrabene Wasserlöcher in diesen Alluvionen dienen meist nur der Tränke des Viehs.

4.2.2 Verwitterungszone

Unter "Verwitterungszone" (frz.: les alterites) soll hier die Zone zwischen jüngerer, sedimentärer Bedeckung und dem nur rein tektonisch veränderten, kristallinen Untergrund verstanden werden. Die chemische Verwitterung in dieser Zone fand vor allem in humiden, tropischen Zeitabschnitten des Quartär und Tertiär statt. Sie hat die Struktur des Ausgangsgesteins vollkommen zerstört. Die Einzelminerale sind, von unten nach oben zunehmend, zersetzt. Die mineralogische und geochemische Bildung dieser Alteritzone ist u. a. bei Guiraud (1975), Pion (1979), und Engalenc (1978) beschrieben.



Abb. 12 Schematisches Profil durch die Verwitterungszone über dem granitischen Sockel Westafrikas (nach Guiraud, 1975)

Die Mächtigkeit und hydrogeologische Nutzbarkeit dieser Verwitterungszone hängt von mehreren Faktoren ab:

I. - von den klimatischen, bzw. paläoklimatischen Bedingungen

II. - von der topographischen Lage

Der Lateritpanzer ist bis auf Fragmente erodiert. Aber auch tiefer liegende Horizonte der quartären und tertiären Verwitterungsdecke, wie die lateritischen Tone und die plastischen Tone (Karrenberg, 1981,) sind z.T. abgeschwemmt.

III. - vom Ausgangsgestein

Über Graniten und Gneisen handelt es sich hauptsächlich um sandige bis kiesige Fraktionen aus Quarzsanden. Die Feldspäte und Glimmer sind mehr oder weniger verwittert.

Über den Grünschiefererien des Birrimien ist die Fraktion eher tonig mit hohem Fe-, Mg-Anteil aus Chloriten.

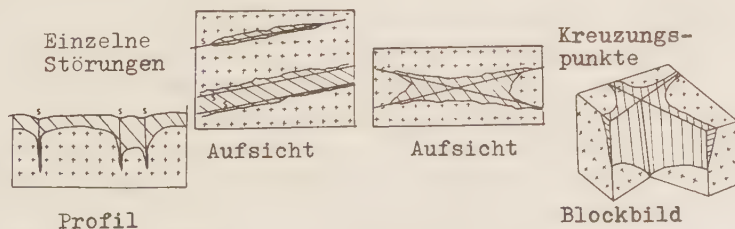
Die Mächtigkeiten der Verwitterungszone liegen über den Graniten und Gneisen durchschnittlich bei 15 m, über den Serien des Birrimien meist darüber. Maximal erreicht sie über 50 m.

IV. - vom Grad der tektonischen Zerrüttung

Je ausgeprägter die tektonische Beanspruchung und Zerrüttung des Ausgangsgesteines ist, um so tiefergehend wirkte die hydrolytische Verwitterung.

Dies ist der entscheidende Punkt für die Anwendung tektonischer Überlegungen für die Grundwasserprospektion in der Verwitterungszone.

Abb. 13 : Schematische Darstellung der Grenze Ausgangsgestein-Verwitterungszone (nach Engalenc, 1975)



Die Skizzen sollen nicht den Eindruck vermitteln, bei der Verwitterungszone handle es sich um einen in sich homogenen Bereich. Sie stellen lediglich die Abgrenzung zum Ausgangsgestein dar.

Auch der nutzbare Porenraum und die Permeabilität der Verwitterungszone hängen stark vom Ausgangsgestein und vom Grad der Verwitterung ab. In den verhärteten lateritischen Tönen (Abb. 12), in denen viele der traditionellen Brunnen liegen, liegt die nutzbare Porosität, vor allem durch biogene Hohlräume bei ca 44 % (Lelong, 1966). In morphologisch tief liegenden Bereichen und bei relativ hoch liegendem Grundwasserspiegel kann diese Zone sehr produktiv sein.

Sehr viel weniger ergiebig ist die Zone der plastischen Tone und tonigen Sande (Abb.12). Von der Gesamtporosität von 43 % sind nur 3 % - 6 % nutzbar (Lelong, 1966). Die geringe Permeabilität verspricht nur geringe Erträge bei der Exploration, z.T. verhindert sie sogar die Infiltration in tieferliegende Grundwasserstockwerke.

Eine gute Permeabilität und einen nutzbaren Porenraum von 15 % - 20 % weisen die relativ grobkörnigen Sande mit Bruchstücken des Muttergesteins an der Basis der Verwitterungszone auf. Viele der jüngeren Bohrungen erfassen diese von der Verdunstung weniger beeinflusste Zone.

Grundsätzlich sind Porosität und Permeabilität in der Verwitterungszone über den vulkanosedimentären Einheiten des Birrimien mit eher toniger Fraktionierung geringer als in den eher sandigen Fraktionen über dem granitischen Sockel.

Bei geringem Tonanteil, ausreichender Mächtigkeit und ausreichender Infiltration kann die Verwitterungszone beträchtliche Grundwasserreserven liefern. Leider jedoch sind diese Bedingungen meist nur zum Teil erfüllt.

4.2.3. Klüfte

Die kristallinen Festgesteine Burkinas haben eine Porosität von 0,2 % - 1 % und einen Durchlässigkeitsbeiwert in der Größenordnung von 10^{-10} m/sec (BRGM, 1983). Erst die Klüftung macht eine hydrogeologische Nutzung des Festgesteins möglich. Wenn auch die Speicherkapazität gering bleibt, so kann doch in den Klüften ein beträchtlicher Abfluß -häufig als Drainage der weniger permeablen Verwitterungszone- gefördert werden.

Der Begriff "Kluft" soll hier im Sinne der Baugrundgeologie und Felsmechanik für alle Trennflächen (Diskontinuitäten) verstanden werden. "längs derer der Zusammenhalt der Substanz aufgehoben

ist, unabhängig davon, ob sie klaffen oder nicht oder ob ein Versatz stattgefunden hat oder nicht" (nach Müller, 1963).

Die Entstehung der Kluft kann tektonisch oder diagenetisch bedingt sein. Sie kann sedimentär oder intrusiv als Gang verfüllt sein.

Weitere Definitionen und Unterscheidungen der Begriffe : Spalte, Bruch, Fuge, Störung, sowie der französischsprachigen Ausdrücke "faille, cassure, joint, etc können Müller (1963), Mattauer (1973) und Gottis und Drogue (1983) entnommen werden.

Die Festgesteine sind in nahezu allen Tiefen gleich häufig von Klüften durchsetzt, wie eine Tiefbohrung im Granitmassiv des Limousin in Frankreich ergab (Gottis u. Drogue, 1983). Bereits bei der Abkühlung eines Plutons entstehen erste Zerrstrukturen (Cloos, 1922). Tektonische Bewegungen erzeugen neue Strukturen mit Längen bis zu mehreren 100 km, die wiederum eine sekundäre Feinklüftung bis in den mm-Bereich herab verursachen.

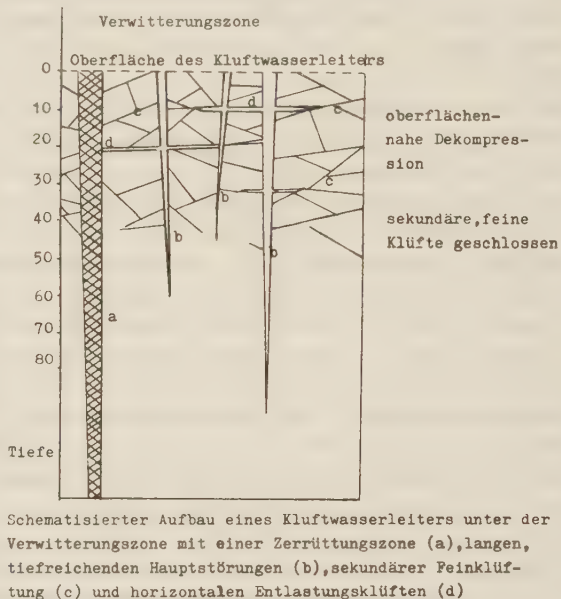
Zahlreiche Faktoren bedingen die hydrogeologische Wirksamkeit dieser Klüfte. Zunächst müssen sie wasserwegsam, d.h. "offen" sein. Offene Klüfte entstehen einmal durch Zugspannungen bei der Abkühlung eines Plutons oder bei tektonischen Zerrbewegungen (Larrson, 1972). Aber auch Druckspannungen können durch spätere, oberflächennahe Dekompression sekundär geöffnete Klüfte hervorrufen (Müller, 1963; Engalenc, 1978). Die Wirkung der oberflächennahen Dekompression hängt ab von der Topographie, von der Mächtigkeit der auflagernden Verwitterungszone, von der primär im Gesteinsverband erzeugten Spannung und vom Deformationsverhalten des Gesteins selbst. Sie ist jedoch vermutlich unabhängig von der Richtung der Kluft.

Die Mächtigkeit der Zone mit dekompressionsgeöffneten Klüften wird durchschnittlich mit 35 m - 40 m angegeben. Darüber hinaus existieren einige wenige, tieferreichende offene Klüfte, meist an mehrere-km langen Störungszonen. Grundsätzlich steht die Tiefe und Öffnungsweite einer Kluft in direktem Zusammenhang zur horizontalen Ausdehnung der Störung (BRGM, 1983).

Dieser Druckentlastung entgegen wirkt der lithostatische Druck. Die Zahl der offenen Klüfte und damit die zu erwartenden Erträge an Kluftwasser nehmen mit der Tiefe sehr schnell ab (BRGM, 1983). Unterhalb 60 m Bohrtiefe sind fast alle feineren Klüfte durch den Auflagedruck geschlossen.

Offene Klüfte können sedimentär verfüllt sein, wobei die eher sandigen Verfüllungen in den Graniten durch die größere Permeabilität höhere Erträge liefern als die tonig verfüllten Klüfte in den vulkanosedimentären Birrimieneinheiten. Gangintrusive Verfüllungen haben unterschiedliche hydrogeologische Auswirkungen gezeigt. Die Dolerit- und Gabbrogesteine haben sicher kaum eine wasserwirksame Feinklüftung. Aber die Intrusion hat häufig im umgebenden Gestein eine Feinklüftung verursacht und liefert deshalb die Chance auf beträchtliche Erträge in der Kontaktzone.

Abb. 14 (nach Engalenc, 1978)



4.3 Infiltration, Grundwassererneuerung

Die Grundwassererneuerung in den Kluftwasserleitern und der Verwitterungszone ist nur schwer meßbar. Die Wasserzirkulation ist meist unbekannt. Tracermethoden sind aufgrund der geringen Durchlässigkeiten zu zeitraubend und aufwendig für die relativ kleinen Einzugsbereiche der Brunnen.

Altersbestimmungen mit der Tritium- und O_{18} -Methode, wie sie in jüngster Zeit im E Burkinas versucht wurden, blieben weitgehend ergebnislos (Engalenc, 1978).

Fast der gesamte Grundwasservorrat des voltaischen Sahel besteht aus Mischwasser. Die meisten neueren Brunnenbohrungen bis zum Festgestein erschließen 2 und mehr Grundwasserniveaus mit unterschiedlichem Alter der Wässer.

In der tieferen Verwitterungszone und den sekundären Klüften des Festgesteins sind die Fließgeschwindigkeiten und somit der Wasseraustausch gering.

In den offenen Großklüften ist die Wasserbewegung wesentlich höher. Rezentes Grundwasser in Großklüften wurde so z.T. unter älterem gefunden (mündliche Mitteilung, CIEH). Das jüngere, tieferliegende Grundwasser ist demnach an entfernter liegenden Stellen infiltriert und in der Großkluft dem Brunnen zugeführt worden.

Über die Höhe der Infiltration gibt es eine Reihe von Berechnungen und Beobachtungen. Lelong (1966) beschreibt Grundwasserspiegelschwankungen in der Alteritzzone über dem granitischen Sockel bis 8 m, bzw. einen maximal beobachteten Grundwasserspiegelanstieg von 6 m innerhalb von 5 Wochen in der Regenzeit.

Engalenc (1978) hat diese Untersuchungen präzisiert. Mit sinkendem Niederschlag sinkt auch der prozentuale Anteil am Niederschlag, der zur Grundwassererneuerung freisteht. Das zunächst in den Boden infiltrierte Wasser verdunstet größtenteils. Während bei 1200 mm Niederschlag noch 24 % der Grundwassererneuerung zukommen, sind es bei 800 mm nur noch 7 %. Als absolutes Minimum für eine, wenn auch noch so geringe, Grundwassererneuerung gibt er 400 mm an.

Trotzdem war während der letzten 10 Jahre, auch bei einem Niederschlag von nur 350 mm für Gorom-Gorom gebietsweise eine Grundwassererneuerung möglich. Erstens fallen die Niederschläge flächenhaft nicht gleichmäßig verteilt, so daß selbst in Trockenjahren mit nur 250 mm punktuell wesentlich höhere Niederschlagsmengen (bis 500 mm) auftreten können. Und zweitens beziehen sich die Beobachtungen sowohl Engalencs, als auch Lelongs, ausschließlich auf die Verwitterungszone. Die Bereiche mit Anstehendem oder mit nur geringmächtiger Verwitterungsdecke, die sicher eine sehr viel schnellere und tiefergehende Infiltration mit Grundwasserabfluß zulassen, blieben dabei unberücksichtigt.

Beide Gründe erklären auch die Diskrepanz der Berechnungen Engalencs (1979) den gemessenen Werten gegenüber. Den Berechnungen zufolge liegen die Grundwasserspiegelschwankungen bei 800 mm Niederschlag und einem nutzbaren Porenvolumen von 2 % (max 5 %) bei maximal 1,1 m (2,8 m). In der Realität erreichen sie aber bis zu 5 m.

4.4 Jüngere, hydrogeologische Projekte im Sahel Burkinas

4.4.1 Ergebnisse

Die anhaltende, große Dürre der Jahre 1970-1973 hat im Rahmen von Entwicklungshilfeprogrammen zu neuen Grundwasserprospektionen und häufiger auch tiefergehenden Brunnenbohrungen geführt (BURGEAP, 1974). Davor war die hydrogeologische Exploration hauptsächlich auf die Alluvionen und die obere Verwitterungszone gerichtet (Lenk, 1965).

Seit 1978 hat das BRGM im Auftrag des HER über 200 Brunnenbohrungen im ganzen Norden Burkinas niedergebracht. Diese Arbeiten sind Teil eines größeren Projektes zur ländlichen Wasserversorgung, an dem alle benachbarten Staaten teilnehmen.

Weitere Brunnenbohrungen werden von privaten Ingenieurbüros (Krüger A/S: projet danois; IWACO) durchgeführt und ebenfalls aus Entwicklungshilfegeldern finanziert.

Die Vorgehensweise bei allen Projekten war sehr ähnlich. Eine Falschfarbensatellitenbildinterpretation (1:200 000) und eine Luftbildinterpretation (1:50 000) bildeten die Grundlage. Bei 1/3 aller Bohrpunkte wurden zusätzlich geoelektrische Profile quer zum interpretierten Lineament gelegt (vgl. Kap. II).

Die Ergebnisse dieser Projekte seien hier kurz zusammengefasst:

1. Fündige Bohrungen ($> 1\text{m}^3/\text{h}$) nach geologischen Einheiten

Geol. Einheit ⁽¹⁾	Ergebnisse	
	BRGM	CIEH
sedimentäres Kamb. u. Infrakamb.	86 %	60 - 85 %
Schiefer und Metavulkanite		
des Birrimien	85 %	75 %
Antebirrimien, Granite	80 %	
grobkörnige basische Serien	80 %	
metamorphe Sockelgesteine, Gneise	47 %	40 %
spät- und nachtekt. Granite	36 %	
Granite allgemein ⁽²⁾		55 %

(1) Die Zuordnung zu den bekannten geol. Einheiten ist in den Berichten nur unzureichend definiert.

(2) Das CIEH trennt leider nicht in Granite des Antebirrimien und spät- und nachtektonische Granite.

2. Fündige Bohrungen nach Lineamentrichtungen:

Antebirrimien, Granite	Region Sebba	Region Aribinda
350°-10°	14 von 15	11 von 15
30 -50°	14 von 17	
40 -50°		9 von 12
60 -100°	15 von 20	
70 -110°		29 von 33
100 -110°		13 von 13
110 -120°	5 von 6	
150 -160°	6 von 6	
<u>Gneise und spättekt. Granite</u>		
60 -70°		3 von 5
80 -100°		8 von 12
130 -140°	4 von 5	
150 -160°		6 von 6

Hier angegeben sind nur die für das Arbeitsgebiet relevanten geol. Einheiten.

Weitere Ergebnisse nach BRGM (1983):

- * Fündig sind knapp 80% aller Bohrungen. Häufig liefern sie aber nur kurzfristig ausreichende Erträge
- * 60 % der fündigen Bohrungen liefern kurzfristig über 1 m³/h
- * 92 % des geförderten Grundwassers wurde vor 60 m Bohrtiefe erschlossen
- * Über den Graniten des Antebirrimien wurden 90 % des Grundwassers in Tiefen zwischen 25 und 45 m erschlossen
- * Es genügt 20 m in den Festgesteinssockel des Antebirrimien einzubohren, um 90 % des Grundwassers zu fördern
- * Die Chance auf ein Grundwasservorkommen übersteigt 90 % bei einer Mächtigkeit der Verwitterungszone von mehr als 15 m
- * Die Erfolgchancen für die Bohrung können von knapp 80% um weitere 5% - 10% gesteigert werden, wenn geoelektrische Profile bei der Prospektion aufgenommen werden.

4.4.2 Kritik und Probleme

1. Bisher fand weder eine Koordination noch ein Datenaustausch der verschiedenen Bohrkampagnen und der verschiedenen Organisationen statt.
2. Hydrogeologische Überlegungen bei der Brunnenbohrpunktfestlegung kollidierten häufig mit regionalplanerischen Aspekten.
3. Die Infiltration, bzw. die Grundwassererneuerung wurden bei den Prospektionsarbeiten kaum berücksichtigt.
4. Der Einsatz von elektrischen und sonnenkollektorbetriebenen Pumpen und die daraus folgende übermäßige Entnahme ließen zahlreiche Brunnen bereits nach wenigen Wochen trockenfallen.
5. Als "fündig" bezeichnet wurden alle Brunnen, die direkt nach der Bohrung $1 \text{ m}^3/\text{h}$ lieferten. Das Grundwasserreservoir vieler Brunnen war aber bereits nach Tagen erschöpft. Zudem liefern die Brunnen im Sahel bei nur 6 stündiger beständiger Entnahme nur noch 5 - 20 % des Anfangsabflusses (BRGM, 1983).
6. An zusätzlichen Informationsquellen wurden nur bei 1/3 aller Bohrungen geoelektrische Profile verwendet.
7. Eine über ein größeres Gebiet flächendeckende Aufnahme wurde nie durchgeführt.
8. Nur die FAO (Astier, 1981) befasste sich mit der Verwendung und Aufbereitung anderer, bereits existierender geophysikalischer Daten in der Grundwasserprospektion.
9. Statistische Ergebnisse von Bohrungen lassen sich nicht übertragen und weitergehend anwenden, wenn der Bezug zu den lithologischen Einheiten oder dem entsprechenden Kluftsystem nicht ausreichend definiert und normiert ist.

Andere Kritikpunkte zu den angewandten Methoden werden im weiteren Text (Kap. II-6) beschrieben und daraus Forderungen für eine verbesserte Prospektion abgeleitet.

II. METHODIK DER GRUNDWASSERPROSPEKTION IN BURKINA FASO

1. Übersicht

Während der großen Dürreperiode Anfang der siebziger Jahre wurden im gesamten Sahel Grundwassererschließungsprogramme durchgeführt. Diese Projekte hatten sich die Aufgabe gestellt, erstens den akuten Wasserbedarf nach 3 nahezu niederschlagslosen Jahren schnell zu decken und zweitens eine langfristig anhaltende, zumindest minimale Wasserversorgung zu garantieren.

Diese Aufgaben sollten durch die Erschließung neuer Grundwasserreserven erfüllt werden. Während bis zu dieser Zeit die traditionellen, handgegrabenen Brunnen ausschließlich Porenwasser der sedimentären Bedeckung und der obersten Verwitterungszone erschlossen, sollten tiefergehende Bohrungen auch die tiefere Verwitterungszone und die Klüfte im Festgestein erschließen.

Sowohl die Prospektion, als auch die spätere Exploration dieser Grundwasserreserven erforderte damals neue Grundlagenuntersuchungen und eine neue Methodik. Für die Bohrpunktfestlegung eines traditionellen Flachbrunnens hatte die lokal sehr begrenzte Einschätzung der Morphologie, Lithologie und Vegetation genügt. Zur Erkennung tiefergehender Klüfte, größerer Störungen und der damit verbundenen, mächtigeren Verwitterungszone war die zusammenfassende Betrachtung und Interpretation eines größeren Gebietes notwendig. Der Einsatz von Fernerkundungsdaten, die im Sahel bis dahin hauptsächlich der allgemeinen Kartographie gedient hatten, bot diese Möglichkeit der regional übersichtlichen Betrachtungsweise. So entwickelte sich ein nach Interpretationsmaßstab gegliedertes 3-Phasenkonzept in der Kluftwasserprospektion, das heute mit Erfolg angewandt wird :

1. Die Übersichtsinterpretation von Satellitendaten zur Erkennung regionaler Störungssysteme in den Maßstäben 1:1 Mio, 1:500 000 und bestenfalls 1:200 000.
2. Die Interpretation von Luftbildern zur größermaßstäblichen Verifizierung der Satellitenbildlineamente und zur Erkennung lokal begrenzter, nur einige 100 m langer Störungen, sowie zur morphologischen Auswertung.

3. Die endgültige Bohrpunktfestlegung im Gelände, die sich der lithologischen, morphologischen und vegetationskundlichen Geländeaufnahme und zusätzlich geophysikalischer Geländemessungen, insbesondere geoelektrischer Profile, bedient.

Mit dieser Methodik wurden allein im Sahel Burkinas in den letzten 13 Jahren von verschiedensten Seiten über 600 potentielle Bohrpunkte festgelegt und in letzter Zeit Bohrbrunnen, vorwiegend mit kleinen Bohrdurchmessern und Pumpen, angelegt.

Obwohl sich sowohl die Qualität von Fernerkundungsdaten, als auch die Verarbeitungs- und Interpretationsmöglichkeiten dieser Daten in den letzten Jahren stark verbessert haben, hat die Nutzung dieser verbesserten Möglichkeiten bisher nur langsam Eingang in die praktische Anwendung gefunden.

Das folgende Kapitel beschreibt zusammenfassend die in Burkina eingesetzten Prospektionsmethoden unter besonderer Berücksichtigung der von Astier (et al, 1983) auch für die Grundwasserprospektion empfohlenen Interpretation aeromagnetischer Karten, um daraus Möglichkeiten und Ansätze für eine Optimierung -in diesem Fall speziell der Auswertebasis- abzuleiten.

2. Fernerkundungsdaten und Interpretationsmethoden

2.1 Satellitenbilddauswertung von Landsat MSS-Daten

Die Satellitensysteme Landsat 1-3 und die damit aufgenommenen Daten sind in einer Vielzahl von Veröffentlichungen hinreichend beschrieben. Den speziellen Einsatz dieser Daten in der Kluftwasserprospektion in Burkina beschreiben Bannert et al. (1980), Sawadogo (1982), Armand et al. (1983) und eine Reihe interner Arbeiten des Fernerkundungszentrums (CRTO) in Ouagadougou.

Die Auswertung dieser Daten in Maßstäben von 1:1 Mio, 1:500 000 und 1:200 000 erfolgte auf Schwarz-Weiß Abzügen der Kanäle 5 und 7 und -seltener- auf Falschfarbendarstellungen der Kanäle 4, 5, und 7 .

Aus den Landsat-MSS-Daten primär interpretiert wurden dabei:

- Grenzen photogeologischer Einheiten anhand unterschiedlichen Spektralverhaltens,
- dichte Vegetationsgebiete mit starker Reflexion im Kanal 7 ,
- Lineamente (O'Leary, 1976),
- Böden mit unterschiedlichem Spektralverhalten,
- die Feuchtvegetation zur Bestimmung des Gewässernetzes

Aus diesen und anderen Daten abgeleitet wurden geologische, pedologische und tektonische Übersichtskarten. Weitere Untersuchungen an Entwässerungsnetz- und Lineamentkarten führten über Richtungs- und Dichteberechnungen, Gewässernetztypenauswertungen bis zu Abschätzungen der Alteritmächtigkeit (Bourguet et al, 1981) oder dem Landesentwicklungspotential (Bannert et al, 1980).

2.1.1 Lineamentauswertung aus Landsat MSS-Daten

Der Definition O'Learys entsprechend ist ein "Lineament" ein "kartierbares, einfaches oder zusammengesetztes, lineares Merkmal an der Oberfläche, dessen Komponenten gradlinig oder schwach gekrümmt angeordnet sind und welches sich deutlich von der Anordnung angrenzender Merkmale unterscheidet und anscheinend ein unter der Erdoberfläche liegendes Phänomen durchpaust". Zahlreiche weitere Definitionen des bereits von Hobbs (1904) verwendeten Begriffs sind bei Sawadogo (1982) zusammengefasst. Da auch die Interpretation von Lineamenten aus Fernerkundungsaufnahmen hinreichend beschrieben ist, kann hier direkt auf die Auswertemethoden von Lineamentkarten eingegangen werden.

Die gebräuchlichste, mit einer weiteren Verarbeitung verbundene Auswertung ist die Richtungsanalyse von Lineamenten. Verschiedene Softwareprogramme (z.B. "Lindig", Henkel, 1982) geben die Häufigkeit, Gesamtlänge und mittlere Länge von digitalisierten Lineamenten pro Richtung in 10⁰-Schritten an. Die getrennte Berechnung von Häufigkeit und Länge pro Richtung ist wichtig für die Unterscheidung verschiedener Größenordnungen von Lineamenten pro Richtungseinheit. Insbesondere zur Interpretation der Grundwasserhöflichkeit spielt die Länge des Lineamentes eine entscheidende Rolle.

Umgekehrt können anhand tektonischer Modelle oder anhand durchschnittlich längster Lineamente pro Richtung bevorzugt tieferreichende Störungsrichtungen als potentiell kluftwasserhöffiger herausgefiltert werden.

Weitere Aussagen können aus der Dichte der interpretierten Lineamente, d.h. der Anzahl von Lineamenten pro Flächeneinheit getroffen werden. Die Dichte wird mit speziellen Programmen (z.B. "Liniso", Henkel, 1982) aus den digitalisierten Lineamenten berechnet. Das Ergebnis ist eine Isolinkienkarte mit frei wählbarer Isolinkienabstand. Aus solchen Lineamentdichtekarten werden Aussagen zur Lithologie und zum Grad der tektonischen Zerrüttung abgeleitet. Bannert et al. (1980) interpretieren aus der Dichteberechnung einer Lineamentauswertung und aus zusätzlichen Faktoren für ganz Burkina kluftwasserhöffige Zonen in Gebieten erhöhter Lineamentdichte.

Beide Berechnungen, sowohl die der häufigsten Lineamentrichtungen, als auch die der Dichten sind sekundär aus der Lineamentinterpretation abgeleitete Ergebnisse. Daraus ergeben sich gewisse Einschränkungen, die in Kap. IV-2.6 ausführlicher beschrieben sind, hier aber bereits erwähnt werden müssen:

- Die Richtungsauswertung von Satellitenbildlineamenten kann durch Beleuchtungswinkel, Flugbahn und Scanlinieneffekt beeinträchtigt sein.
- Die Dichteberechnung von Lineamenten wird durch Schatteneffekte, Grad der Oberflächenbedeckung und Zeitaufwand bei der Lineamentauswertung beeinflusst.

2.1.2 Gewässernetz- und Vegetationsauswertung

Auf der Basis von Falschfarbenverarbeitungen werden die im Norden Burkinas nur saisonal wasserführenden Flußsysteme aufgrund höherer Vegetationsdichte interpretiert. Gewässernetzkarten können so angefertigt werden (Abb. 43). Aus Typ und Dichte des Gewässernetzes und dem Grad der Verzweigung lassen sich Rückschlüsse auf die Lithologie (Bourguet et al, 1981) und die tektonische Beeinflussung bei der Anlage des Gewässernetzes (Horton, 1945 ;List, 1970) ziehen.

Rote Farben in der Falschfarbendarstellung weisen auch außerhalb der Trockentäler auf hohe Vegetationsdichte und damit auf oberflächennahe Grundwasservorkommen und wasserspeichernde Böden hin.

2.2 Luftbilddauswertung

Der zweite Schritt bei der Grundwasserprospektion in Burkina umfasst die Auswertung von Luftbildern. Diese wird bereits wesentlich länger als die Satellitenbilddauswertung auf Schwarz-Weiß-Abzügen im Maßstab 1:50 000 eingesetzt. Eine erste Befliegung in Burkina fand bereits 1956 durch das französische "Institut Geographique Nationale" (IGN) statt. Seit 1980 verfügt das "Institut Geographique de Burkina Faso" (IGBF) über ein eigenes Flugzeug und vertreibt die neueren Luftbilder selbst.

Gegenüber den in der regionalen Prospektionsphase verwendeten Satellitenbildern bieten die Luftbilder eine höhere Auflösung und den größeren Auswertemaßstab. Zusätzlich ermöglicht die stereoskopische Bedeckung die Interpretation morphologischer Oberflächenphänomene. Das Gewässernetz kann damit detaillierter erfasst werden.

Die Lineamentauswertung wurde bereits lange vor ihrem Einsatz auf Satellitenbildern in der Luftbildinterpretation verwendet. Wie beschrieben, werden dabei geradlinige, nicht anthropogene Oberflächenphänomene, in diesem Fall auch aus der Morphologie, kartiert. Bevor die Luftbildlineamente in der Dichte- oder Richtungsberechnung weiterverarbeitet oder direkt kartographisch ausgewertet werden, werden sie von der Zentralprojektion auf eine parallel projizierte Kartenbasis entzerrt. Aus den Luftbildern lassen sich Lineamente weiter spezifizieren, in solche mit morphologischer Bedeutung, vegetationsbedingte oder nur auf lithologischen Reflexionsunterschieden basierende (vgl. Abb. 52). Weiter wird versucht Satellitenbildlineamente im Luftbild geometrisch exakter zu lokalisieren. Die Erfahrung hat allerdings gezeigt, daß Luftbild- und Satellitenbildlineamente aufgrund des unterschiedlichen Auswertemaßstabs sowohl im direkten Vergleich, als auch in der statistischen Auswertung nicht korrelieren müssen (Engalenc, 1979).

Neben den Lineamenten werden aus den Luftbildern die Ansiedlungen, d.h. die Orte des Wasserbedarfs kartiert und die Entfernungen zu den potentiellen Bohrpunkten abgeschätzt.

Die Auswertungen der Satelliten- und Luftbilder werden zusammengefasst.

2.3 Kombinierte Strukturkarte aus Satellitenbild- und Luftbildlineamenten

Sowohl das CRTO, als auch das BRGM (Armand, 1980) und die privaten Consultings (Krüger A/S, 1984) stellen die Lineamentauswertungen aus Satelliten- und Luftbild in einer gemeinsamen Karte dar. Diese Überlagerungen von Lineamentkarten werden nur für die Gebiete direkten Wasserbedarfs, d.h. einige km rund um größere Dörfer, nicht aber flächendeckend durchgeführt.

Unter Berücksichtigung der Entfernung zu den Wasserbedarfspunkten werden auf der Basis dieser Karte Lineamentkreuzungspunkte, soweit vorhanden besonders die, mehrerer km-langer Satellitenbildlineamente, als grundwasserhöffige, potentielle Bohrpunkte auf ca 60 m x 60 m genau lokalisiert.

Lineamente, die mit jahreszeitlichen, oberflächlichen Abflüssen korrelieren, werden dabei bevorzugt.

Lineamente mit Streichrichtungen, die in diesem Gebiet als bevorzugt kluftwasserhöffig bekannt sind, werden ebenfalls selektiert.

Als Bohrpunkte ausgewählt werden bevorzugt Kreuzungspunkte möglichst langer Lineamente, die morphologisch tief am Rand eines Trockentales oder Mares und nahe am Wasserbedarfsort liegen.

3. Bohrpunktfestlegung im Gelände

3.1 Allgemeine Kriterien

Für die Festlegung eines Bohrpunktes zur Kluftwassererschließung ist die Genauigkeit von 60 m x 60 m nur ungenügend, so daß der exakte Punkt erst im Gelände bestimmt werden kann. Die Morphologie, der Boden und die Vegetation geben den Ausschlag.

Eine Bohrung wird sicher nicht in die Mitte eines jahreszeitlich überfluteten Trockentals, sondern an dessen Rand, nahe phreatischer Vegetation und bei ausreichend mächtiger Verwitterungsdecke niedergebracht. Die Bohrung sollte auf der selben Bachseite wie das zu versorgende Dorf sein und durchschnittlich nicht weiter als 600 m bis 1000 m davon entfernt.

Soweit dies aufgrund der Sandbedeckung möglich ist werden lithologische und tektonische Unstetigkeitsstellen genau auskartiert und von der Bohrung erfasst.

3.2 Geophysikalische Geländemessungen

In vielen Fällen geben die beschriebenen allgemeinen Kriterien keine exakten Hinweise auf die genaue Lage der Unstetigkeitsstelle und die für nutzbare Grundwasservorkommen minimal benötigte Mächtigkeit der Verwitterungszone und somit den relativ günstigsten Bohrpunkt. Deshalb führte das BRGM (1983) in ca 1/3 der Fälle, private Consultings häufiger, zusätzliche geophysikalische Geländemessungen durch.

3.2.1 Geoelektrische Sondierung

Dieses Verfahren wird für die Mächtigkeitsbestimmung der Verwitterungszone eingesetzt. Dazu werden die Elektroden (A,B) einer Stromquelle in den Boden gesteckt. An den zwischen den Elektroden liegenden Sonden (M,N) wird der Spannungsunterschied gemessen. Durch Vergrößern des Elektrodenabstandes werden tiefere Schichten vom Strom erfasst und der scheinbare spezifische Widerstand kann für immer tiefere Bereiche errechnet werden. Anhand des vertikalen Widerstandsprofils lassen sich die Mächtigkeiten der sedimentären Bedeckung und der Verwitterungszone ableiten.

Im hydrogeologisch günstigen Fall liegt die Mächtigkeit der Verwitterungszone zwischen 15 m und 30 m.

Die Mächtigkeitsbestimmung der Verwitterungszone ist auch vor einer geoelektrischen Profilmessung zur Abschätzung der gewünschten Meßtiefe über den Elektrodenabstand A-B nötig.

3.2.2 Geoelektrische Horizontalprofilmessung

Dieses Verfahren dient der horizontalen Festlegung von Unstetigkeitsstellen, beispielsweise der Lokalisierung von Rändern einer Zerrüttungszone.

Wie bei der geoelektrischen Sondierung wird der scheinbare spezifische Widerstand errechnet, in diesem Fall in einem gewählten Tiefenbereich. Dazu wird sowohl der Elektrodenabstand A-B, als auch die Spannungsmeßstrecke M-N konstant gehalten. Die gesamte Meßanordnung wird senkrecht zum interpretierten Lineament, der möglichen Störung, fortbewegt.

Das resultierende Horizontalprofil zeigt Widerstandsunterschiede und läßt daraus Unstetigkeitsstellen interpretieren. Grundwasser in einer Zerrüttungszone senkt den elektrischen Widerstand, so

daß i. A. Minima im Widerstandsprofil als grundwasserhöfFIG angesehen werden können.

Außer grundwasserführenden Störungen senken u. a. auch Erze, Salze oder Graphit den scheinbaren, spezifischen Widerstand.

3.2.3 Elektromagnetik, Seismik

Elektromagnetische Messungen werden in Burkina kaum eingesetzt. Wegen hoher Kosten und großem technischen Aufwand werden auch refraktionsseismische Untersuchungsmethoden zur Bestimmung der AlteritätMächtigkeit oder des Grundwasserspiegels selten verwendet.

4. Magnetische Daten in der Grundwasserprospektion

Grundwasservorkommen zeigen keine Anomalien in magnetischen Messungen, doch lassen sich anhand magnetischer Daten, kombiniert mit weiteren Untersuchungen, geologische Grenzen zwischen Gesteinen, Schichten oder Erzen mit unterschiedlichem Gehalt an magnetischen Mineralen auskartieren. Besonders die im Norden Burkinas häufigen basischen Serien und speziell die Doleritgänge zeichnen sich durch höhere Anomalien-Amplituden (50 gamma - 300 gamma*) in der Totalintensität gegenüber den Graniten (5 gamma - 100 gamma) aus. Eine Unterscheidung des Anteils remanenter und induzierter Magnetisierung ist für die qualitative Auswertung von geologischen Grenzen und Unstetigkeitsstellen ohne größere Bedeutung (Astier et al 1983).

Das CIEH (1984) hat bei 4 Grundwasserbohrungen Totalintensitätsmessungen zusammen mit geoelektrischen Profilmessungen zur Lokalisierung des kluftwasserhöfFIGen Kontaktbereiches von Doleritgängen und basischen Intrusivkörpern durchgeführt und bezeichnet die Kombination dieser beiden Methoden als am ökonomischsten zur exakten Lokalisierung von Unstetigkeitsstellen des Sockels.

* magnetische Meßwerte werden in Burkina in gamma angegeben:

1 gamma = 1 nT = 10^{-5} Gauß (nT= Nanotesla)

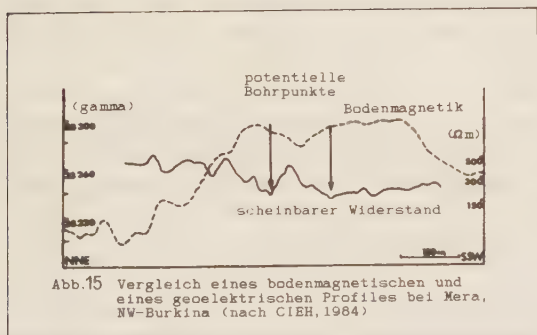
4.1 Bodenmagnetik

Mit Hilfe eines Protonenspinmagnetometers werden mit nur geringem Aufwand Totalintensitätsprofile aufgenommen.

Interpretiert werden können daraus,

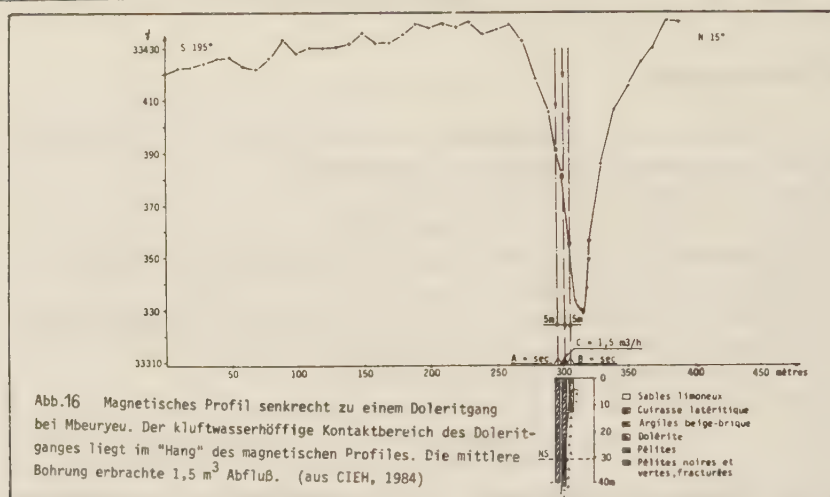
1. Klüfte und Störungen in die basische Gesteine intrudiert sind,
2. die genauen Grenzen basischer Intrusivkörper auch unter der sedimentären Bedeckung,
3. Änderungen in der Mächtigkeit der sedimentären Bedeckung und
4. bedingt die geologischen Grenzen anderer Gesteine mit unterschiedlichen magnetischen Eigenschaften.

Quantitative Auswertungen sind anhand einfacher Profile schwierig. Je nach Magnetisierungsrichtung und Erstreckung des Störkörpers gegenüber magnetisch Nord schwanken die Größenordnungen der Totalintensitätsänderungen. Zur Interpretation der hydrogeologisch interessanten Unstetigkeitsstellen genügt die qualitative Aussage.



Der Vergleich eines der 4 vom CIEH (1984) aufgenommen magnetischen Profile mit dem entsprechenden geoelektrischen Profil zeigt eine gewisse Korrelation (Abb. 15)

Ein relatives Minimum im Totalintensitätsprofil fällt darin mit einem Maximum des elektrischen Widerstandes zusammen. Zu beiden Seiten des Maximums im Widerstandsprofil liegen die beiden absoluten Minima und die günstigsten Bohrpunkte. Die Kombination beider Profile läßt einen schmalen Block, eher noch einen Gang, basischen Gesteins in dem umgebenden Granit, mit geklüftetem Kontaktbereich vermuten.



Eine Bohrung bei Mbeuryeu, die den geklüfteten Randbereich eines vermuteten Doleritganges erschließen sollte, wurde ausschließlich anhand magnetischer Profile niedergebracht. Aus dem Luftbild konnten in diesem Gebiet keine Lineamente interpretiert werden.

Abb. 16 zeigt das magnetische Profil und die drei je nur 5 m von einander entfernten Bohrungen. Die mittlere erbrachte einen Abfluß von 1,5 m³/h.

Der Vergleich eines zweiten magnetischen mit einem geoelektrischen Profil bei Yaouga (CIEH, 1984) zeigt ein ähnliches Ergebnis. Weitere methodische Untersuchungen des CIEH dazu sind unter dem Forschungskennzeichen PNUD (1)-75/008 noch im Gange und bisher unveröffentlicht.

Folgende Aussagen für die Kluftwasserprospektion lassen sich daraus zusammenfassen:

- Aus den magnetischen Messungen interpretiert werden können Störungen mit großem Versatz, doleritisch verfüllte Störungen und die Grenzen basischer Serien im Allgemeinen. Die für die Kluftwasserprospektion interessante Zone liegt dabei in den Bereichen großer Gradienten im magnetischen Reliefs.
- Weiter interpretieren lassen sich Änderungen in der Alteritmächtigkeit.
- Magnetische Daten müssen kombiniert mit weiteren Daten ausgewertet werden.
- Nicht erkannt werden unverfüllte Störungen ohne größeren Versatz.

4.2 Aeromagnetik

4.2.1 Aeromagnetische Daten in Burkina

Magnetische Profile können für größere Areale vom Flugzeug aus aufgenommen werden. Insgesamt 11 000 km N-S gerichteter magnetischer Profillinien mit einem EW-Abstand von 500 m wurden 1972 von der kanadischen Survair Ltd. aus 150 m Flughöhe im Norden Burkinas aufgenommen. Terra Surveys Ltd (1977) berechnete aus diesen Profilen aeromagnetische Karten der Totalintensität in den Maßstäben 1:200 000 und 1:50 000 mit geologischer Interpretation. Die Interpretation aeromagnetischer Karten ist bei Bosum (1981) sehr ausführlich beschrieben. Sie beruht im Wesentlichen auf der rechnergestützten Erkennung vorgegebener Störkörpermodelle.

"Magnetische Einheiten" werden zusammengefasst nach der Amplitude, der Frequenz, der Länge und Lage ihrer magnetischen Achse und dem Verhältnis zu angrenzenden Einheiten. Die Zuordnung zu geologischen Einheiten erfolgt unter Berücksichtigung weiterer Daten.

Die in N-Burkina häufigen Doleritgänge und andere basische Serien zeichnen sich auf der geographischen Breite von 14° , also relativ nahe dem magnetischen Äquator, unabhängig von der Richtung ihrer Erstreckung, als Minima aus.

Die aeromagnetischen Karten sind die einzigen geophysikalischen Daten, die flächendeckend vom Sahel Burkinas existieren. Alle übrigen Messungen sind Verifizierungen vermuteter Störungen, nahe den heutiger Ansiedlungen.

Dieser Aspekt der Flächendeckung kann für eine mittelfristige Landes- und Regionalplanung, besonders bei dem hohen Anteil nomadisierender Bevölkerung und der Überweidung und Verwüstung einzelner Gebiete noch eine entscheidende Rolle spielen.

4.2.2 Aeromagnetische Daten in der Kluftwasserprospektion

Die FAO (Astier, 1981) hat versucht die bis dahin ausschließlich lagerstättenkundlich genutzten aeromagnetischen Daten in der Kluftwasserprospektion einzusetzen. Sie führte dazu keine eigenen Auswertungen durch, sondern beschränkte sich auf die hydrogeologische Nutzung der nach Terra Surveys (1976) interpretierten aeromagnetischen Karten.

Dabei fiel die höhere Anzahl und größere Länge von Störungen und Gängen gegenüber der geologischen Karte und den Landsat-Auswertungen auf, wobei WNW-gerichtete Gänge und NNE- bis ENE-gerichtete Störungen vorherrschten. Diese größere Anzahl und Ausdehnung beruht auf der Tatsache, daß sowohl die geologische Geländearbeit, wie auch die Luft- und Satellitenbildauswertung durch sandige und andere Oberflächenbedeckungen in N-Burkina gegenüber den aeromagnetischen Messungen stark eingeschränkt sind.

Astier (1981) setzte 182 Standorte von bekannten Brunnen im Sahel in Relation zur nächsten, aus der aeromagnetischen Karte interpretierten Störung, geologischen Grenze oder zum nächsten Gang (Abb. 17).

Seine Auswertungen zeigen erstens, daß die näher an aeromagnetischen Störungen gelegenen Brunnen durchschnittlich höhere Abflusssmengen liefern.

Zweitens leitet er aus dem raschen Abnehmen der Brunnenenergiebigkeiten bei Entfernungen von mehr als 600 m zur nächsten aeromagnetischen Störung ab, daß eine von der Störung hervorgerufene Feinklüftung durchschnittlich einen 600 m breiten Streifen beidseitig der Störung durchsetzt (vgl. auch Jaskolla, 1978).

Und drittens schließt er aus dem Vorhandensein einer solchen Feinklüftung auf den tektonischen Ursprung der aus der Aeromagnetik interpretierten Unstetigkeitsstellen. Die Störungen in der interpretierten aeromagnetischen Karte können also genau wie Luft- und Satellitenbildlineamente betrachtet und mit diesen kombiniert werden.

Distance en m Débit en m ³ /h	D > 1000	600 < D < 1000	300 < D < 600	D < 300	Nombre d'ouvrages
< 1	30 ouvrages 50,9 %	20 ouvrages 50 %	11 ouvrages 30,6 %	12 ouvrages 25,5 %	73
1 à 2	13 ouvrages 22 %	7 ouvrages 17,5 %	9 ouvrages 25 %	12 ouvrages 25,5 %	41
2 à 4	10 ouvrages 16,9 %	7 ouvrages 17,5 %	9 ouvrages 25 %	12 ouvrages 25,5 %	38
> 4	6 ouvrages 10,2 %	6 ouvrages 15 %	7 ouvrages 19,4 %	11 ouvrages 23,5 %	30
Nombre d'ouvrages	59	40	36	47	182

Abb. 17 Darstellung von 182 Brunnen nach ihrer Ergiebigkeit und ihrer Entfernung (D) zur nächsten, aus der Aeromagnetik interpretierten Störung (aus Astier et al, 1983)

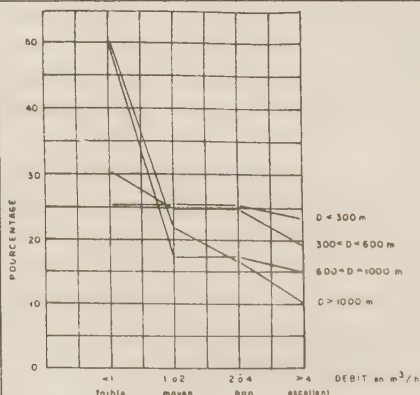


Abb. 18 Prozentsatz von Brunnen mit geringer, mittlerer guter und sehr guter Ergiebigkeit je nach Entfernung zur nächsten "aeromagnetischen" Störung. (aus Astier et al, 1983)

Aeromagnetische Daten lassen, von ihrem Maßstab her, Vergleiche mit geophysikalischen Bodenprofilen nur bedingt zu. Um trotzdem, ähnlich den Vergleichen magnetischer und geoelektrischer Bodenprofile, die Tendenz aufzuzeigen, werden in Abb. 19 geoelektrische Profile mit den aeromagnetischen Daten verglichen.

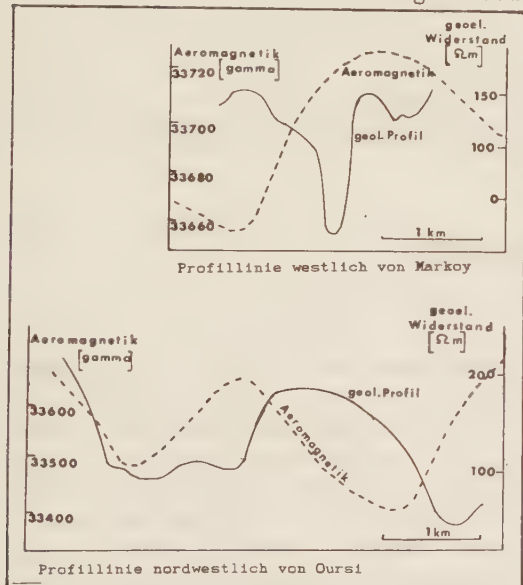


Abb. 19

Vergleich geoelektrischer Profile (nach BRGM, 1981, Bohrberichte) mit aeromagnetischen Profilen aus den Karten 1:50 000.

oben: E-W- Profil westlich von Markoy (Markoy Ranch);

unten: NNW-SSE-Profil nordwestlich von Ursi.

Auch in Botswana wurden in jüngster Zeit aeromagnetische Daten in der Grundwasserprospektion miteingesetzt (Buckley, 1984). Da dort keine Interpretation der aeromagnetischen Karte vorlag, wurde diese zusammen mit Landsat-Daten durchgeführt. Eines der Satellitenbildlineamente, in dem eine der später niedergebrachten Bohrungen liegt, zeigt in den aeromagnetischen Daten eine deutliche, mehrere 10 km lange "Stufe". Das Satellitenbildlineament läuft über eine längere Strecke parallel zu den isomagnetischen Linien.

Wie der Vergleich magnetischer und geoelektrischer Profile (Abb. 15 u. 19) zeigt, liegen lithologische Grenzen, aber auch tektonische Unstetigkeitsstellen mit basischen Intrusionen oder beträchtlichem Versatz im Bereich linear erstreckter Änderungen der isomagnetischen Linien. Grundwasserhöfliche Unstetigkeitsstellen liegen somit am Wahrscheinlichsten in Bereichen größerer Gradienten der aeromagnetischen Daten.

Der Umkehrschluß, aeromagnetische Änderungen korrelierten mit lithologischen oder tektonischen Unstetigkeitsstellen läßt sich nicht, oder nur mit mehreren weiteren Bedingungen führen.

Die Einsatzmöglichkeiten aeromagnetischer Daten in der Kluftwasserprospektion, insbesondere durch kombinierte Auswertung mit Fernerkundungsdaten, werden in der vorliegenden Arbeit weiterverfolgt.

Eine verbesserte Grundwasserprospektion kann in vielen Entwicklungsländern relativ kostengünstig ermöglicht werden, wenn die größtenteils bereits vorhandenen aeromagnetischen Daten adäquat eingesetzt werden.

5. Weitere Interpretationsgrundlagen

5.1 Topographische Karten

Topographische Karten des IGN und des IGBF existieren in Maßstäben von 1:200 000 mit einer Isolinenäquidistanz von 20 m. Diese Karten werden zum Teil für morphologische Auswertungen zur Bestimmung von Abflüssen und Abflußrichtungen benutzt.

Durch morphologische Erhöhungen mit steilen scharfen Rändern zeichnen sich sowohl die posttektonischen Intrusivkörper, als auch die Lateritkuppen aus. Die geringeren Höhenunterschiede in den für die Prospektion interessanten Ebenen mit Serien des Präkambrium D liegen unter der Äquidistanz von 20 m und sind nicht oder nur über das Gewässernetz zu interpretieren.

Das Gewässernetz ist nur unvollständig in diese Karten aufgenommen. Saisonale Überschwemmungsgebiete sind markiert.

An Vegetationstypen werden "lichter Wald, Buschsavanne, Grasbedeckung, brousse tigre*" und vegetationslose Gebiete" grob unterschieden. Die angegebenen Vegetationsgrenzen sind nicht exakt und verändern sich rasch.

Die zahlreichen eingezeichneten Ansiedlungen vermitteln einen Eindruck der Besiedlungsdichte und -verteilung im Sahel. Einige der kleineren Siedlungen sind inzwischen verlassen und an anderen Orten neu aufgebaut.

* Unter "brousse tigre" wird ein von regelmäßigen Vegetationsbögen, bzw. -bändern durchzogenes Gebiet verstanden.

Entstehungsbedingungen werden u.a. bei Barth (1977) beschrieben.

5.2 Geologische Karten

Die geologischen Karten 1:1 Mio (Hottin, Quedraogo, 1975), 1:500 000 (Ducellier, 1963) und 1:200 000 (Delfour Jeambrun, 1970) dienen wie die topographischen Karten der Übersichtsauswertung. Die eingezeichneten Störungen liegen meist in den morphologisch erhabenen und daher hydrogeologisch weniger interessanten Serien des Präkambrium C. Die geologischen Grenzen sind vom Maßstab her und aufgrund der schlechten Aufschlußverhältnisse für die Fragestellung nicht genau genug erfasst.

5.3 Pedologische Karten

Die pedologischen Grenzen der Karte 1:500 000 (ORSTOM, 1975) entsprechen im Sahel der zu vier groben Einheiten zusammengefassten geologischen Karte. Eine praktische Nutzung sowohl für die Kluft-, als auch für die Porenwassererschließung ist aufgrund des Maßstabes und der geringen Differenzierung der Einheiten nicht möglich. Eine weitere bodenkundliche Karte 1:1 Mio (aus Bannert et al, 1980) ist aus den selben Gründen nur in der Regionalplanung einsetzbar.

5.4 Vegetationskarte

Die Vegetationskarte (Terrible, 1974) beschreibt für ca 40 Bestimmungspunkte im Blatt Dori, 3 davon im Gebiet des Spot-Simulationssausschnittes, den Artenbestand. Die Bestimmungspunkte liegen durchschnittlich 10 km auseinander, beschrieben werden jedoch nur die Arten auf einer Fläche von ca 100 m². Die Standorte werden nach ihrem Milieu, mit permanentem oder saisonalem Wasserbedarf oder als vollkommen trocken, beschrieben. Anhand der im Kapitel I-1.4 beschriebenen grundwasseranzeigenden Arten, lassen sich aus dieser Karte einzelne Bestimmungspunkte mit wahrscheinlichem Grundwasservorkommen interpretieren. In der Regel sind dies allerdings Punkte in Trockentälern oder an Maren, deren erhöhte Grundwasserhöflichkeit bereits bekannt war.

Ein Ausschnitt der Vegetationskarte ist im Anhang abgebildet.

5.5 Klimatologische Daten

Basierend auf den Meßdaten der Stationen Dori, Gorom-Gorom, Markoy, Oursi und Aribinda werden von ASECNA alljährlich Niederschlagskarten für das gesamte Departement Sahel herausgegeben. Die Isohyeten sind darin auf sehr große Flächen extrapoliert. Aus den Niederschlagswerten und der Anzahl der Regentage können zwar Abschätzungen zur Grundwassererneuerung speziell in diesen größten Orten des Sahel getroffen werden, diese aber nicht auf das gesamte Arbeitsgebiet übertragen werden.

6. Methodische Zusammenfassung und Kritik

Tabelle 2 stellt die in Burkina eingesetzten Prospektionsmethoden und ihren Aussagegehalt in der Zusammenfassung dar.

Bei der Anwendung einzelner oder kombinierter Methoden, muß neben dem rein hydrogeologischen, auch ein ökonomischer Faktor berücksichtigt werden. Konkret bedeutet dies, die beste Methode zur exakten Lokalisierung von Unstetigkeitsstellen, die geoelektrische Profilmessung, kann aus Gründen des technischen und finanziellen Aufwandes nur nach ausreichenden vorausgehenden Arbeiten in genau festgelegten Zonen eingesetzt werden, nie jedoch flächendeckend in lokalem oder gar regionalem Maßstab.

Die methodischen Ziele der Kluftwasserprospektion gehen daher in zwei Richtungen:

1. Die Interpretationsmöglichkeiten lithologischer und tektonischer Unstetigkeitsstellen müssen effizienter werden. Der Prozentsatz von tatsächlich klufterfassenden Bohrungen soll, wenn möglich, von 80% noch weiter gesteigert werden. In jedem Fall aber muß das Verhältnis von Zeitrahmen und finanziellem Aufwand zu fruchtbarer Bohrung verbessert werden.

2. Die Bohrungen müssen höhere, vor allem aber beständigere Erträge liefern. Dazu müssen die Möglichkeiten verbessert werden, kluftwasserführende von trockenen Störungen bereits in den ersten beiden Phasen der Prospektion anhand der Satelliten- und Luftbilder mit größerer Wahrscheinlichkeit abzugrenzen.

Dahin können wiederum zwei Wege führen:

a) eine intensive Grundlagenforschung zur tektonischen Genese der verschiedenen Störungssysteme und

b) eine verstärkte Interpretation zusätzlicher Daten wie Vegetation und Morphologie. Die Vegetation läßt sich auf der Basis der bisher verwendeten Landsat MSS-Falschfarbenverarbeitungen und den Luftbildern nur sehr beschränkt, mit allen weiteren Verfahren gar nicht interpretieren (vgl. Tab. 2).

Diesen beiden methodischen Zielen kann durch die weiterführende Nutzung neuerer Fernerkundungsverfahren ein Schritt näher gekommen werden. Der Einsatz höher auflösender Aufnahmesysteme und spezielle, nutzungsbezogene Bildverarbeitungsmethoden erhöhen die Anzahl interpretierbarer Lineamente und deren geometrisch exakte Lagebestimmung. Die Überlagerung weiterer flächenhafter Meßdaten, wie der Aeromagnetik, erhöhen den Informationsgehalt der Bildprodukte für die ersten beiden Prospektionsphasen. Auch zur verbesserten Interpretationsmöglichkeit der Vegetation aus den Fernerkundungsdaten müssen anwendungsorientierte Verarbeitungen eingesetzt werden.

Die genannten, speziell anwendungsbezogenen Verarbeitungen verlangen zwar einen erhöhten finanziellen Aufwand und eine genauere Interpretation in den ersten Prospektionsphasen, schränken aber den wesentlich kostenträchtigeren Zeitaufwand im Gelände und damit die Gesamtprospektionskosten ein.

Tab. 2

Tab. 2

Methodik und Aussagegültigkeit in der Klüftwasserprospektion in Burkina Faso

METHODE	AUSGABE		Lokalisierung		Lithologie		von Gesteins- grenzen		Art der Schicht- bedeckung		Vegetation Morphologie		Geoklima- bedeckung	
	eines Linien- mentes allgem.		einer definier- ten Geol. Störung		eines Linien- mentes allgem.		einer definier- ten Geol. Störung		Art der Schicht- bedeckung		Vegetation Morphologie		Geoklima- bedeckung	
Salvillenbildinter- pretation von Land- sat. Aufnahmen u. Farbabspiegelungen	bedingt (1)	bedingt (1)	bedingt (2)	bedingt (2)	ja	ja	bedingt (1)	bedingt (1)	nein	nein	bedingt (4)	nur grob	ja	flächendeckend
Luftbildauswertung	bedingt (3)	bedingt (3)	bedingt (2)	bedingt (2)	ja	ja	bedingt (3)	bedingt (3)	bedingt	bedingt	bedingt (8)	ja	ja	flächendeckend
Auswertung von geol. Karten	ja	bedingt (6)	bedingt (6)	bedingt (6)	ja	ja	zum Teil	nein	nein	nein	nur grob	grob	flächendeckend	flächendeckend
topograph. Karten	nein	nein	nein	nein	bedingt	bedingt	nein	nein	nein	nein	3 Einheiten	20m Äqui- distanz	ja	flächendeckend
pedolog. Karten	bedingt (7)	bedingt (7)	nein	nein	bedingt	bedingt	bedingt	bedingt	nein	nein	nein	grob	grob	flächendeckend
Vegetationskarten	nein	nein	nein	nein	ja	ja	punktuell möglich nein	nein	nein	nein	punktuell ja	nein	nein	flächendeckend
seromagn. Karten	bedingt	ja	bedingt	bedingt	ja	ja	bedingt	bedingt	ja	nein	nein	nein	nein	punktuell
geoelekt. Sondierung	bedingt	Hangend/Liegend	nein	nein	ja	ja	bedingt	bedingt	grobe Ände- rungen ja	nein	nein	nein	nein	flächendeckend
geoelekt. Profil	bedingt	ja	ja	ja	ja	ja	bedingt	bedingt	grobe Ände- rungen ja	nein	nein	nein	nein	punktuell
magn. Profil	bedingt	ja	ja	ja	ja	ja	bedingt	bedingt	grobe Ände- rungen ja	nein	nein	nein	nein	kurze Profile
elektromag. Messung	bedingt	ja	ja	ja	ja	ja	bedingt	bedingt	grobe Ände- rungen ja	nein	nein	nein	nein	kurze Profile

(1) "photogeol. Einheiten" lassen sich nach Spektralverhalten und Textur

(2) abgrenzen.

(3) nur ohne Oberflächenbedeckung als Grenze zweier photogeol. Einheiten.

(4) durch panchromatisch unterschiedliches Reflexionsverhalten und

(5) Texturunterschiede. geol. Karten beruhen wohl hauptsächlich auf

(6) die vorhandenen geol. Karten beruhen wohl hauptsächlich auf

(7) die vorhandenen geol. Karten beruhen wohl hauptsächlich auf

(8) die vorhandenen geol. Karten beruhen wohl hauptsächlich auf

(9) die vorhandenen geol. Karten beruhen wohl hauptsächlich auf

(10) die vorhandenen geol. Karten beruhen wohl hauptsächlich auf

(11) die vorhandenen geol. Karten beruhen wohl hauptsächlich auf

(12) die vorhandenen geol. Karten beruhen wohl hauptsächlich auf

(13) die vorhandenen geol. Karten beruhen wohl hauptsächlich auf

(4) bei ausreichender Vegetationsdichte sind grobe Unterscheidungen verschiedener Vegetationstypen möglich

(6) größere Bäume sind einzeln und Büsche in Gruppen unterscheidbar nicht jedoch bestimmbar; Grasvegetation ist nur z. T. durch Texturunterschiede erkennbar.

Die vorliegende Tabelle gibt lediglich einen Überblick über die in der Klüftwasserprospektion in Burkina eingesetzten Daten und ihre Auswertmöglichkeiten. Nicht berücksichtigt sind darin, neben Klimatologischen, meteorologischen, geologischen, hydrogeologischen, geobotanischen, geographischen, ge

Die vorliegende Tabelle gibt lediglich einen Überblick über die in der Klüftwasserprospektion zu berücksichtigenden Faktoren und ihre Auswertmöglichkeiten. Nicht berücksichtigt sind darin, neben klimatologischen Faktoren, mineralogische, tektonische, vegetationskundliche und andere Detailuntersuchungen, die in der 3. Prospektionsphase, bei der Geländearbeit, durchgeführt werden müssen.

III. KONZEPTION UND ENTWICKLUNG SPEZIELLER FERNERKUNDUNGS- UND
BILDVERARBEITUNGSVERFAHREN ZUR ANWENDUNG IN DER GRUNDWASSER-
PROSPEKTION IM SAHEL BURKINA FASO

1. Einführung

Die vorigen Kapitel beschrieben -insbesondere für Burkina- den bisherigen Einsatz von Fernerkundungsverfahren in der Grundwasserprospektion. Aus der bei dieser Anwendung gewonnenen Erfahrung, den dabei auftretenden Mängeln, unter Einbeziehung neuerer Aufnahmesysteme und vor allem unter Ausnutzung der Bildverarbeitungsmöglichkeiten sollen verbesserte Auswertegrundlagen für die konkrete Anwendung in N-Burkina erarbeitet werden.

Das Ziel, verbesserte Interpretationsgrundlagen zur Identifizierung von Unstetigkeitsstellen zu schaffen, beinhaltet in diesem Fall auch die Auswahl anwendungsoptimierter Darstellungsformen.

Um den konkreten Einsatz kombinierter und aufwendig verarbeiteter Daten in Burkina erst möglich zu machen, muß das Endbild so dargestellt sein, daß auch -oder gerade- ein mit den neuesten Bildverarbeitungsmethoden weniger vertrauter Geländegeologe in Westafrika die Möglichkeit hat, möglichst viele der im Bild enthaltenen Informationen richtig zu interpretieren.

Bei der Datenauswahl zur Realisierung eines entsprechenden Konzeptes in einem Entwicklungsland muß folgenden Aspekten Rechnung getragen werden:

- der generellen Verfügbarkeit von Infrastrukturdaten,
- der Verfügbarkeit aufgabenspezifischer Daten (geophysikalischen Daten, Fernerkundungsdaten, Brunnendaten etc),
- der konkreten Aussagekraft der Daten in Hinblick auf die Zielsetzung und eng damit verbunden
- dem finanzielle Realisierungsrahmen für die Datenbeschaffung.

Vom Bildverarbeiter erfordern diese Bedingungen die Einarbeitung in die spezielle Thematik, in diesem Fall in die Hydrogeologie N-Burkinas, ebenso wie die genaue Kenntnis der späteren Auswertemöglichkeiten im Land. Er muß die thematische Relevanz verschiedener Datensätze für die Gewichtung in der Bildverarbeitung richtig abschätzen und dabei deren Beschaffungsmöglichkeit und das Verhältnis von Kosten zu Aussage berücksichtigen.

Die Erwartungen und Anforderungen der hydrogeologischen Prospektionsgeologen -den späteren Anwendern- müssen bei der Verarbeitung und Aufbereitung der Daten einfließen.

In diesem Fall waren spezielle Untersuchungen zur Darstellung der trockenen, chlorophyllarmen Vegetation nötig. Vegetationsauswertungen an den üblicherweise verwendeten Falschfarnebildern ergaben nämlich, daß diese Darstellungsform, wie auch die Ratios MSS 7/5 und 6/5, in diesem Gebiet nur einen Teil der Vegetation zufriedenstellend abbildet. Um auch aus der im Falschfarnebild kaum erkennbaren Steppenvegetation hydrogeologisch relevante Schlüsse ziehen zu können, wurden an bekannten Referenzflächen vegetationsindizierende Grautöne gemessen, gefiltert und gesondert dargestellt.

In den folgenden Kapiteln werden damit neben neueren Aufnahmesystemen verschiedene, für den operationellen, hydrogeologischen Einsatz meist neue Bildaufbereitungsmethoden zur speziellen Anwendung in Burkina beschrieben und auf ihren verbesserten Aussagegehalt und ihre routinemäßige Anwendbarkeit hin getestet.

Die bereits in anderen Arbeiten beschriebenen theoretischen Grundlagen bekannter Methoden sind dabei zugunsten spezieller Untersuchungen für die Anwendung im Arbeitsgebiet nur zusammengefasst dargestellt. Lediglich besonders günstig erscheinende Verfahren, sowie die Verwendung einer modifizierten GIS-Software sollen ausführlicher beschrieben werden. Auf die grundsätzliche Anwendbarkeit aeromagnetischer Daten in der Kluftwasserprospektion wurde bereits im vorigen Kapitel (II-4) eingegangen.

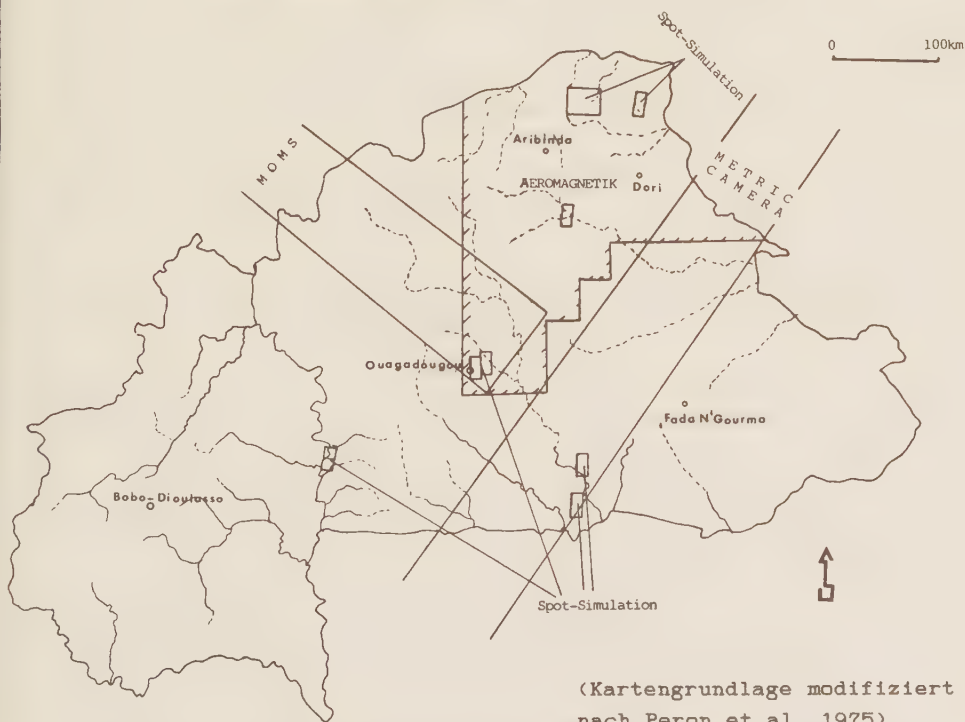
Diese Überlagerung geophysikalischer -in diesem Fall aeromagnetischer- Daten auf bereits aufbereitete Satellitendaten wird jedoch von ihrem Aufwand her besonderen Wassermangelgebieten mit maskierender Oberflächenbedeckung vorbehalten bleiben.

2. Einsatzmöglichkeit neuer Fernerkundungssysteme in Burkina

2.1 Verfügbare neuere Fernerkundungsdaten in Burkina

Für Auswertungen in einem Land wie Burkina Faso können nicht in jedem Fall die gleichen Erwartungen an technische Voraussetzungen und Verfügbarkeit von Daten gesetzt werden, wie für die europäischen Länder. Die Anwendung muß hier mit dem vorhandenen, insgesamt doch recht umfangreichen, Datenmaterial auskommen und dieses möglichst effektiv einsetzen.

Abb. 20: Fernerkundungsdaten in Burkina Stand Aug. 1985
(außer Landsat-MSS und -TM* und Luftbildern)



(Kartengrundlage modifiziert
nach Peron et al, 1975)

* TM-Daten sind seit Sommer 1985 für ganz Burkina erhältlich,
wurden aber in dieser Arbeit nicht mehr berücksichtigt.
(vgl. Anhang: Zusammenstellung der existierenden TM-Daten in BF)

Tab. 3: Bezugsadressen für Fernerkundungsdaten von Burkina

Landsat MSS und TM: EROS-Datcenter, jetzt EOSAT
Sioux Falls, s.d.57198
Telex 9106680310 usgs eros sfl

SPOT-Simulationsdaten: GDTA, 18 av. Edouard Belin,
F 31055 Toulouse Cedex,
Telex CNEST 531081 F

MOMS als Magnetband oder Papierabzug: DFVLR-PT-WF
Postfach 906058, 5000 Köln-90
Telex 8874410 dfvwd

Metric Camera als SW-Dia oder Papierabzug: DFVLR
8031 Oberpfaffenhofen
Telex 5274203

Aeromagnetische Daten als Karten 1:50 000 und 1:200 000:
Bureau de la geologie et des mines de BF
BP 601, Ouagadougou, Burkina Faso

Luftbilder Alter als 1980: IGN-Phototheque, 2 av. Pasteur
F 94160 St. Mande
ab 1981: Institut géographique de BF,
av. de l'Independance, Ouagadougou, BF

2.2 Einsatzmöglichkeiten neuerer Fernerkundungssysteme zur
Kluftwasserprospektion in Burkina Faso.

Bisher in Burkina eingesetzt wurden neben den Luftbildern des IGN und des IGBF lediglich Standardfalschfarbenverarbeitungen von Landsat MSS-Szenen in Maßstäben < 1:200 000 (Kap. II-2).

In jüngster Zeit liefern z.T. zwar nur experimentell eingesetzte Aufnahmesysteme operationell auswertbare Daten die Arbeitsmaßstäbe bis 1:50 000 wie die Luftbilder zulassen und zusätzlich eine spektrale Differenzierung erlauben.

Wenn hier und im Folgenden von einem Auswertemaßstab von 1:50 000 gesprochen wird, so bezieht sich dieser auf die thematische Kartierung zur Festlegung potentieller Bohrpunkte, nicht auf die Neuaufnahme topographischer Karten (vgl. Jensch, 1970). Die Pixelgröße der Spot-, MOMS- und TM-Daten liegt in diesem Maßstab bei 0,4 mm, bzw. bei 0,6 mm, also bereits über der Strichstärke. Daher können potentielle Bohrpunkte auch in diesem Maßstab bestenfalls auf ca 60 m x 60 m eingegrenzt werden.

2.2.1 Spot-Simulationsdaten

Das Spot 4-Kanal Scannersystem wurde im Oktober und November 1981 mit einer Mystere-20 in ca 7000 m über Grund (Ouagadougou 3300 m) geflogen. Alle Szenen sind am vormittag (9 - 12 Uhr) aufgenommen. Der in der Arbeit verwendete Ausschnitt "Markoy" stammt vom 23.10.81, 11.00 Uhr. Der Sonnenstand betrug 65°.

Bei den Simulationsdaten haben alle Kanäle eine Auflösung von 20 m, d. h. die 592 (516) x 1200 Pixel der Markoy-Szene überdecken eine Fläche von 10,3 x 24 km. Die Inklination entspricht mit 98,7° Grad der Spot-Satellitenflugbahn; ebenso entsprechen die Spektralkanäle denen des satellitengetragenen Systems. Da es sich bei der Simulation jedoch um eine einmalige Aufnahme handelt, sind weder stereoskopische, noch multitemporale Auswertungen möglich.

Das satellitengetragene System von Spot ist seit Feb. 1986 im Umlauf und Spot Satelliten-Daten werden ab Sommer 1986 regelmäßig erhältlich sein.

Tab. 4: Spot Systemcharakteristika

Flughöhe	832 km	
Inklination	98.7°	
Orbitwiederholung	alle 26 Tage	
Spektralkanäle:	Multispektral	Panchromatisch
	500-590 nm	510-730 nm
	610-680 nm	
	790-890 nm	
Auflösung	20 x 20 m	10 x 10 m
Pixel/Linie	3000 bis 5200	6000 bis 10400
Szenenbedeckung	60 x (60 bis 85 km)	

Anwendbarkeit

Während des Arbeitszeitraumes waren die Spot-Simulationsdaten - von Landsat MSS abgesehen- die einzig digital vorliegenden Multispektraldaten des Sahel in Burkina. Im Vergleich zu den Landsat MSS-Daten zeigen sie mit der Auflösung von 20 m (gegen-

über 80 m beim MSS) eine vollkommen andere Größenordnung von Oberflächenphänomenen.

Kleinere, morphologische Unterschiede in der sandbedeckten Ranch bei Markoy indizieren eine Änderung des Substrates unter dem Dünsand (vgl. Bild 6). Diese Größenordnungen von Phänomenen ist in den MSS-Daten nicht mehr zu erkennen.

Der panchromatische Kanal, bei dieser Simulation nur mit einer Auflösung von 20 m, liefert kaum neue Informationen. Zwar läßt er sich mit Hilfe der im Folgenden beschriebenen Methoden kontrastverstärken und geometrisch korrigieren, doch hat er dem gewöhnlichen SW-Luftbild gegenüber nur durch sein digitales Format Vorteile. Mit seinem umfassenden Aufnahmeband im sichtbaren Bereich eignet er sich jedoch als Basis für Überlagerungen mit Daten anderer Spektralbereiche oder sonstiger Meßdaten (vgl. Bild 4 u. 5). Beim satellitengetragenen Spot-System ist die Bodenauflösung dieses Kanals mit nur 10 m der anderer Aufnahmesysteme mit Scannerprinzip überlegen.

Zur Identifizierung lithologischer Grenzen durch spektrale Unterschiede, besonders aber zur Identifizierung vegetationsbedeckter Flächen, bieten die Spot-Spektralkanäle eine vollkommen neue Grundlage. Der NIR-Kanal liegt im Reflexionsmaximum der Vegetation, der Rotkanal sehr exakt im Absorptionsmaximum (vgl. Abb. 26). Nur der Thematic Mapper (TM) hat ähnlich genaue und spektral enge Aufnahmebereiche. Diese beiden Kanäle bieten in ihrem Ratio die ideale Voraussetzung für eine Vegetationsdarstellung. Der Grünkanal ist etwas breiter gewählt als der rote. Er umfaßt sowohl das Reflexionsmaximum gesunder Vegetation im Grünen, als auch das des Bodens im Grün-Gelben. Der TM hat in diesem Spektralbereich zur Unterscheidung Boden/Vegetation 2 Aufnahmekanäle.

Neben den TM-Daten bieten z.Zt. nur die Spot-Simulationsdaten die Möglichkeit Falschfarbendarstellungen im Sahel effektiv einzusetzen. Die bisher verwendeten Landsat MSS-Daten zeigen außerhalb der Regenzeit bei dieser Verarbeitung nur in den Trockentälern rote, chlorophyllindizierende Farben (Kap. III-5). Demgegenüber erfaßt Spot mit seiner verbesserten Auflösung im NIR-Kanal auch die kleineren Vegetationsinseln. Selbst die Hirsefelder mit geringem Chlorophyllgehalt und nur wenig dichter Vegetationsoberfläche erscheinen rötlich farbdifferenziert. Mit diesen Möglichkeiten der Vegetationsdarstellung boten die Spot-Simulationsdaten während des Arbeitszeitraumes die besten

Aussagemöglichkeiten zur Identifizierung vegetationsverändernder Grundwasservorkommen.

Das satellitengetragene Spot-System ist trotz der Flugbahnwiederholung nur alle 26 Tage (TM: 16 Tage) auch für Erntevorhersagen geeignet. Durch die Drehbarkeit des Aufnahmespiegels lassen sich von parallelen Flugbahnen her dieselben Gebiete alle 5 Tage erfassen.

Die stereoskopische Aufnahmemöglichkeit des Spot-Satellitensystems wird in diesem Gebiet mit maximalen Höhenunterschieden von nur 80 m, auch für die hydrographische Auswertung, wenig zum tragen kommen.

Eine entgeltliche Bewertung von Spot-Daten sollte jedoch erst auf der Basis der Satellitendaten und bei deren operationellem Einsatz erfolgen, auch wenn sich mit den Simulationsdaten erfolgversprechende Ansätze für die hydrogeologische Anwendung zeigen.

2.2.2 Thematic Mapper (TM)

Zur Zeit der Projektbearbeitung existierten von den Landsat-4,-5 Systemen nur MSS-Daten, die über die westafrikanische Empfangsstation Mas Palomas übertragen werden konnten. TM-Daten über Westafrika sind erst seit Sommer 1985 erhältlich und konnten daher, trotz ihres sicher sehr hohen Potentials nicht mehr berücksichtigt werden. Die Spektralkanäle lassen einen mindestens so hohen Informationsgehalt wie die Spot-Daten, evtl. mit geringen Abstrichen in der geometrischen Auflösung, erwarten. Eine Zusammenstellung aller am 1.11.85 für Burkina erhältlichen TM-Szenen findet sich im Anhang.

Tab. 5: Landsat TM Systemparameter

Flugbahn:	polar	Sensoren:	
Flughöhe:	705 km	Band 1	450 - 520 nm
Aufnahmewiederholung:	16-tägig	Band 2	520 - 600 nm
Bodenauflösung:	30 m	Band 3	630 - 690 nm
	im Band 6: 120 m	Band 4	760 - 900 nm
Bedeckung:	185 km x 185 km	Band 5	1550 - 1750 nm
	pro Szene	Band 6	10400 - 12500 nm
		Band 7	2080 - 2350 nm

2.2.3 MOMS

Für einen 90 km breiten NW-SE verlaufenden Flugstreifen zwischen der Grenze nach Mali und Ouagadougou existieren MOMS-Satelliten-Daten vom Februar 1984. Auch diese Daten erlauben wesentlich exaktere Auswertungen als die MSS-Daten. MOMS ist ein reines Aufnahmesystem, das bisher bei den STS-7 und STS-11 Missionen des Spaceshuttle eingesetzt wurde.

Die Betonung bei diesen Missionen lag zwar auf der Geräte-erprobung, nicht auf der Gewinnung optimal anwendbarer Daten. Trotzdem können diese Daten auch praktisch eingesetzt werden.

Tab. 6: MOMS-Systemparameter für Burkina

Aufnahmedatum:	6.2.84	10.36 Uhr
Flugbahn:	28,5°	Inklination
Flughöhe:	289 km	
Spektralkanäle:	Band 1	575 - 625 nm
	Band 2	825 - 975 nm
Bodenauflösung:	20 m	bei 300 km Flughöhe
Bedeckung:	138 km	quer zur Flugrichtung

Anwendbarkeit in Burkina

Korrigierte (radiometrisch und geometrisch) MOMS-Daten der STS-11 Mission sind erst seit Ende Oktober 85 erhältlich. Vorkorrigierte SW-Abspielungen der Gegend um Ouagadougou wurden, im Rahmen dieser Arbeit, mit verschiedenen Geländegeologen in Burkina Faso auf ihren Informationsinhalt hin beurteilt. Überzeugend war dabei die hohe geometrische Auflösung von 20 m, die durch feine Musterunterschiede lithologische Grenzen schon in den Einzelkanälen deutlich macht. Alle Kontraste in diesen Daten sind im Kanal 1 wesentlich schärfer zu erkennen. Der Kanal 1 bietet, aufgrund technischer Mängel im Kanal 2, auch für die Vegetationsinterpretation in diesem Gebiet die wesentlich bessere Grundlage.

Eine Chlorophyllreflexion im 900 nm Bereich ist in diesem semi-ariden Gebiet zu dieser Jahreszeit fast ausschließlich in den Flußtälern zu erwarten (vgl. Kap. III-5).

Am besten für die Vegetationsinterpretation eignet sich das Ratio der beiden Kanäle (NIR/Grün).

Ein zusätzlicher Rotkanal könnte die Interpretationsmöglichkeit der Vegetation aus MOMS-Daten verbessern.

Auch für Strukturauswertungen zur Kluftwasserprospektion eignet sich der Grünkanal mit seinem hohen Kontrastumfang besser.

Die für den SWIR-MOMS geplanten 2 zusätzlichen Aufnahmekanäle bei 1600 nm und 2200 nm, ähnlich den TM-Kanälen, werden für eine rein hydrogeologische Anwendung kaum neue Impulse geben. Möglicherweise läßt sich der 1600 nm Kanal zur Vegetationsunterscheidung, jedoch nur während der Regenzeit, heranziehen.

Beim ebenfalls geplanten Einkanal-Stereo-MOMS werden die Daten, sowohl von der geometrischen, als auch von der radiometrischen Auflösung her, denen des panchromatischen Spot-Kanals entsprechen.

MOMS-Daten der STS-11 Mission von Burkina wurden parallel zu dieser Arbeit für die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und deren Grundwassererschließungsprogramm nördlich von Ouagadougou verarbeitet. Auswertungen und praktische Ergebnisse werden ab Frühjahr 1987 vorliegen.

2.2.4 Metrische Kamera

Im Gegensatz zu den bisher beschriebenen, neueren Aufnahmesystemen ist die metrische Kamera kein digital registrierendes Scanner-System, sondern ein rein optisches Aufnahmesystem. Die Kamera, eine umgebaute Zeiss-RMK, ist mit einem 305 mm Zeiss Topar Objektiv ausgestattet.

Der Aufnahmezeitpunkt Nov/Dez war aufgrund des niederen Sonnenstandes relativ ungünstig gewählt. Für die Breiten von Burkina Faso und die geringen morphologischen Unterschiede dort, spielt dies jedoch kaum eine Rolle.

Von Burkina Faso existieren 8 SW-Aufnahmen von denen jede eine Fläche von 189 x 189 km abdeckt (Tab.7).

Leider sind alle diese Aufnahmen mehr oder weniger durch Wolken gestört, so daß sich kein größeres Gebiet zusammenhängend auswerten läßt. Die Bildqualität der wolkenfreien Ausschnitte ist sehr gut.

Tab. 7: Aufnahmen der Metrischen Kamera in Burkina

Bildnummer	Zentrumsordinate	Wolkenbedeckung*
678	11,0°N, 0,8°W	1654
679	11,6°N, 0,5°W	1215
680	12,2°N, 0,0°	0122
681	12,8°N, 0,3°E	1101
682	13,3°N, 0,6°E	4111
683	14,0°N, 1,1°E	1020
684	14,6°N, 1,5°E	1620
685	14,9°N, 1,6°E	9925

*Die Wolkenbedeckung ist in 4 Quadranten angegeben (0=wolkenfrei)
Alle Bildern sind am 5.12.83 mit Blende 5,7 und 1/575 sec Belichtungszeit aufgenommen. Die Überlappung in Flugrichtung beträgt 60%.

Praktische Anwendbarkeit

Die wolkenfreie, photographierte Fläche in Burkina ist zu klein, um diese Aufnahmen für mehr als Systemtests einsetzen zu können. Interessant bei einem Wiederflug wären wolkenfreie IR-Farbaufnahmen gegen Ende der Regenzeit.

Das System kann nur auf einer wiederverwendbaren Raumfähre eingesetzt werden. Eine Datenübertragung ist nicht möglich. Trotzdem können die Daten schon wenige Stunden nach Landung der Raumfähre als photographische Arbeitsgrundlage zur Verfügung stehen. Dies kann einen Zeitvorteil gegenüber den aufwendig vorzuverarbeitenden Digitaldaten dann bedeuten, wenn dieses optische System routinemäßig eingesetzt wird und Photos ohne allzulange Vorplanungszeit aufgenommen werden können.

Demgegenüber sind digitale Bildverarbeitungen und Überlagerung mit anderen Daten nur mit großem Aufwand, durch die nachträgliche Digitalisierung des Photos, möglich. Rein von der Auflösung her übertrifft dieses System augenblicklich die Systeme mit Scannerprinzip.

Zusätzliche Möglichkeiten zur spektralen Unterscheidung von Oberflächenphänomenen aus Schwarz-Weiß-Photographien sind nicht zu erwarten.

ANWENDUNGSORIENTIERTE BILDVERARBEITUNG SPEZIELL FÜR HYDRO-
GEOLOGISCHE AUSWERTUNGEN IN BURKINA FASO

3. Übersicht

Um hydrogeologische Aussagen aus Fernerkundungsdaten abzuleiten, bieten je nach Arbeitsgebiet und hydrogeologischer Situation verschiedene Aufnahmesysteme, verschiedene Aufnahmezeiten und verschiedene Bildverarbeitungsmethoden die optimale Grundlage.

Wie im Kapitel "Hydrogeologie" (I-4) beschrieben, existieren im Sahel 3 mehr oder weniger günstige Grundwasserexplorationsziele:

- * die sedimentäre Bedeckung
- * die Verwitterungszone und
- * die Klüfte und Störungen im Substrat

Alle 3 Ziele erfordern zu ihrer bestmöglichen Interpretierbarkeit unterschiedliche Bildverarbeitungsmethoden.

* Porenwasser in der sedimentären Bedeckung

Das meist nur jahreszeitlich vorhandene, oberflächennahe Porenwasser in der sedimentären Bedeckung drückt sich durch flächenhafte, relativ dichte, niedrige Gras- und Buschvegetation aus. Häufig sind diese Grasflächen landwirtschaftlich genutzt.

Zur Darstellung dieser Bereiche sind Aufnahmen zu Beginn der Trockenzeit, mit vegetationsdedektierenden Kanälen nötig.

Verarbeitungen können vom üblichen Reflexionsverhalten von Chlorophyll ausgehen, so daß sich für die Aufnahmemonate Aug., Sept., Okt. die Ratios 6/5 oder 7/5 des MSS anbieten. Auch aus den Standardfalschfarbendarstellungen von Landsat MSS lassen sich die Bereiche landwirtschaftlich nutzbarer Flächen interpretieren.

Für ganzjährig ergiebige Brunnen sind die sedimentären Porenwasserleiter durch ihren hohen Evapotranspirationsverlust jedoch weniger geeignet.

* Verwitterungszone und Klüfte im Substrat

Die Mächtigkeit der Verwitterungszone hängt unter anderem vom Substrat ab, steht aber auch in direktem Verhältnis zur Größenordnung einer tektonischen Störzone (BRGM, 1983).

Für die Grundwasserexploration besonders wertvoll sind Mächtigkeiten der Verwitterungszone von 15 - 40 m (Engalenc, 1979).

An lithologischen, wie an tektonischen Unstetigkeitsstellen reicht die Verwitterungszone tiefer in das Festgestein als in Bereichen ohne Unstetigkeitsstellen.

Ob die Verwitterungszone in den tektonisch überprägten Bereichen tatsächlich mächtiger ist als in anderen, hängt von der Morphologie ab. Häufig sind Unstetigkeitsstellen des Festgesteinssockels durch Trockentäler markiert.

Diese lithologischen und tektonischen Unstetigkeitsstellen sind also bei nicht abgeschwemmter Verwitterungsdecke die Ziele von Kluftwasserbohrungen.

Aufgabe einer speziell für diese Zielsetzung ausgelegten Bildverarbeitung muß es demnach sein solche Unstetigkeitsstellen zu verdeutlichen und sie genau lokalisierbar und interpretierbar zu machen.

Im Gegensatz zu Darstellungen für die Interpretation porenwasserhöffiger Zonen in der Sedimentbedeckung, wo die Spektralkanäle entscheidend waren, spielt für die Kluftinterpretation die räumliche Auflösung die größere Rolle.

Trockenzeitaufnahmen ohne maskierenden Grasbewuchs zeigen feine, lithologisch oder tektonisch bedingte Reflexionsunterschiede im Sediment oder im Anstehenden deutlicher, als Aufnahmen aus der Vegetationsperiode. Zudem zeigt der etwas niedrigere Sonnenstand (ca 60° im Dez/Jan anstatt 75-90° im Mai bis Aug) morphologische Strukturen im Satelliten- und Luftbild deutlicher.

Höchstauflösende Aufnahmen vom Dezember und Januar sind somit für die Strukturanalyse im Sahel am geeignetsten.

Die Methoden der Bildverarbeitung müssen darauf abzielen, diese Strukturen, die sich als Lineamente mit sehr unterschiedlicher Erstreckung darstellen, besonders zu verdeutlichen.

Die Kontrastverstärkung sollte zumindest bei den ersten Bearbeitungen richtungsunabhängig sein. Pseudoplastische Darstellungen würden Strukturen in Beleuchtungsrichtung unterdrücken.

Eine Highpassfilterung erfüllt die Voraussetzung der richtungsunabhängigen Kontrastverstärkung. Dabei werden jedoch nicht alle Größenordnungen von Grautonstetigkeiten gleich verstärkt, so daß spezielle Untersuchungen zur Größe (Anzahl der Pixel) der zu verstärkenden Strukturen vorangehen müssen (Abb.23/24).

Die Highpassfilterung kann auf einzelne Kanäle, wie auch zur Farbdarstellung auf mehrere Spektralkanäle angewandt werden.

Das Problem vegetations- oder sedimentmaskierter Oberflächen wurde bereits mehrfach angesprochen. Es erscheint daher sinnvoll neben Aufnahmedaten des sichtbaren und NIR-Bereichs des elektromagnetischen Spektrums, auch andere, von der Oberflächenbedeckung weitgehend unabhängige Daten (z.B. Geoelektrik oder Aeromagnetik) zusätzlich zu verwenden.

Geoelektrische Daten liegen in Burkina nur in Form sehr kurzer (<100 m) Meßprofile vor, die eine Kombination mit den Fernerkundungsdaten vom Maßstab her nicht erlauben.

Demgegenüber existieren für den gesamten N-Teil des Landes aeromagnetische Aufnahmen (Terra Surveys, 1977).

Durch die Digitalisierung, Interpolation und geometrische Anpassung dieser Meßdaten mit einer modifizierten ESRI-GIS-Software (vgl. Kap.IV-6.2) lassen sie sich den optischen Daten überlagern und so kombiniert auswerten.

Vorteile bringt diese Überlagerung insbesondere in den sandbedeckten Bereichen, wo sich bekannte Strukturen in den aeromagnetischen Daten fortführen lassen, die in den Fernerkundungsdaten nicht mehr weiterzuverfolgen waren.

Darüberhinaus sind die aeromagnetischen Daten in ihrer Überlagerung mit den Oberflächenmeßdaten einfacher und genauer zu interpretieren, als durch den einfachen Vergleich mit anderen Karten. Besonders Strukturen sind ohne die Abbildungen der Erdoberfläche, nur aus der Aeromagnetik, sehr schwierig und ungenau zu lokalisieren.

Um die praktische Anwendung und Interpretation dieser kombinierten Daten in Burkina zu ermöglichen, müssen Darstellungsformen gefunden werden,

- die jeden der verwendeten Datensätze (Grün-, Rot-, IR-Kanal, Aeromagnetik) auch in der Überlagerung individuell interpretierbar machen und
- die möglichst wenig Einarbeitungszeit und Spezialwissen über Bildverarbeitung und Farblehre für die Interpretation voraussetzen.

Die Intensitäts-, Farb-, Sättigungsdarstellung IHS (u.a. Siegal, Gillespie 1980; Haydn et al. 1982-2) erweist sich rein technisch, besonders zur Überlagerung unterschiedlich auflösender Daten als sehr günstig. Die Interpretation einer solchen Darstellung hat sich nach zahlreichen Gesprächen mit Experten in Burkina jedoch als relativ schwierig erwiesen.

Die Kombination einer Falschfarben- und stereoskopischen Darstellung bietet kaum Interpretationsprobleme, erfordert aber die Verwendung eines Spiegelstereoskops zur Auswertung.

Insgesamt ermöglicht die Überlagerung von aeromagnetischen sowohl mit digital aufbereiteten Landsat-MSS, als auch mit Spot-Simulationsdaten, die genauere Lokalisierung einer größeren Zahl von Lineamenten als die herkömmliche Interpretation getrennter Daten (vgl. Kap. IV-3.2).

Die Integration weiterer Daten, sowohl der Fernerkundung (z.B. TM), als auch von Niederschlagsmeßdaten wäre wünschenswert.

Insbesondere flächendeckende, geoelektrische Flugzeugdaten könnten zur Erschließung neuer Grundwasservorkommen in diesem Gebiet beitragen. Bisher sind geoelektrische Flugzeugdaten gar nicht und Niederschlagsdaten nur zu grob vorhanden.

Die Verwendung von TM- oder Spot-Satellitendaten wird eine ähnlich genaue Kluft- und Strukturanalyse im gesamten Sahel Burkinas zulassen, wie sie z.Zt. nur in den Ausschnitten mit Spot-Simulationsdaten möglich ist.

4. Kontrastverstärkung zur verbesserten Interpretierbarkeit von Lineamenten

Die am häufigsten angewandte Methode zur Kontrastverstärkung ist die "lineare Streckung". Die meist relativ wenigen, wirklich besetzten Grauwerte werden dabei auf die volle Dynamik von 256 Graustufen gestreckt. Die Methode ermöglicht es dem Auge, das nur ca. 30 Graustufen zu differenzieren vermag, durch Ausnutzung des gesamten Schwarz-Weiß Spektrums diese 30 Stufen auch wirklich zu unterscheiden.

In der Regel wird die lineare Streckung wie die "Gauß'sche-", die "logarithmische-" oder andere Streck- und Filteroperationen datenabhängig -nicht jedoch anwendungsorientiert- eingesetzt. Sie zielen meist nicht darauf ab, spezielle Phänome selektiv zu verstärken.

Zur besseren Identifizierung von Klüften sollen lineare, z.T. nur sehr geringe Grautonunterschiede einer definierten, räumlichen Größenordnung so dargestellt werden, daß sie deutlicher und besser zu erkennen sind.

Homogene Flächen, d.h. Flächen ohne Grautonschwankungen, also ohne Strukturen, sollen dagegen unterdrückt werden.

Um diese Forderungen zu erfüllen, wurde eine Methode gewählt, die zunächst den Grautonunterschied zur Umgebung darstellt:

die Highpassfilterung.

Um die Information des absoluten Reflexionsvermögens dabei nicht zu verlieren, wurde in der Add-back-Highpassfilterung dieser Grautonunterschied nicht gesondert dargestellt, sondern im Bild zu seinem ursprünglichen Wert addiert. Somit werden im Bild nur Grautonunstetigkeitsstellen, also mögliche lithologische Grenzen, Vegetationsunterschiede, etc. verstärkt; die weitgehend homogenen Flächen dagegen behalten ihren ursprünglichen Grauwert bei.

Die theoretischen Grundlagen dieser und anderer kontrastverstärkender Bildverarbeitungsmethoden sind u.a. beschrieben in Hord (1982), Kronberg (1985), Lillesand (1984), Siegal und Gillespie (1980), Sabins (1978).

4.1 Die Highpassfilterung

Der Rechenalgorithmus der Highpassfilterung berechnet einen neuen Grauwert aus der Differenz des Bildwertes zum Mittelwert der Grauwerte der Umgebung. Diesen Mittelwert der Umgebung bezeichnet man als "Lowpass".

$$\text{Highpass} = \text{Grauwert} - \text{Mittelwert d. umgebenden Grauwerte} \\ (= \text{Lowpass})$$

Die "Umgebung" wird definiert durch eine Filtergröße, d.h. durch die Anzahl der umgebenden Pixel, die zur Mittelwertbildung herangezogen werden (Abb. 21).

Das reine Highpassbild umfasst bei kleinen Filtergrößen nur relativ wenige Grauwerte (Tab.8). Je größer der Filter gewählt wird, um so mehr entspricht das Highpassbild dem ursprünglichen Bild (Abb. 23).

Kleine Filtergrößen zeigen die kleinräumigen Grautonsprünge. Gleichmäßige Grauwertänderungen über größere Flächen werden durch kleine Filtergrößen unterdrückt und erscheinen im gleichen Grauton, wie Flächen ganz ohne Grauwertänderung.

Die Darstellung des reinen Highpass, der auch negative Werte annehmen kann, erfolgt durch Addition- oder Subtraktion zum mittleren Grauwert vom 128.

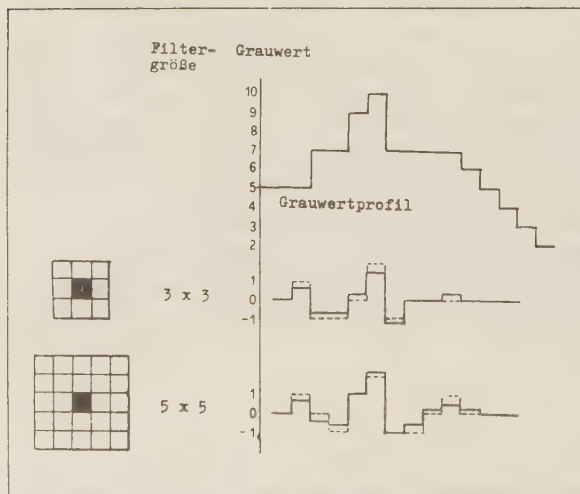


Abb. 21

Reiner Highpass-Filter mit 3x3 und 5x5 Pixeln Filtergröße (gestrichelt: ganzzahlige Grauwerte durch Rundung)

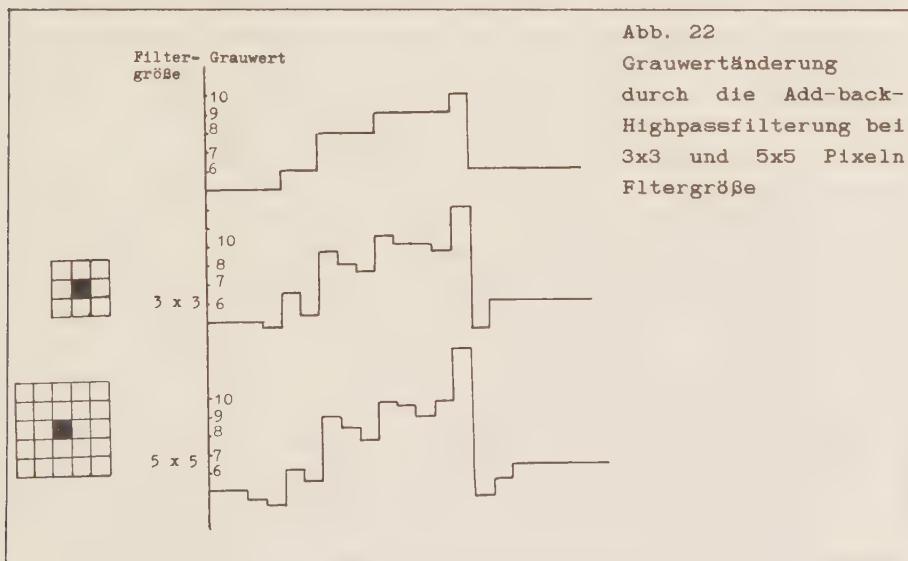
4.2 Die Add-back-Highpassfilterung

Die Add-back-Highpassfilterung addiert die Differenz aus Grauwert und Mittelwert der umgebenden Grauwerte zum ursprünglichen Grauwert.

Add-back-Highpass

$$\begin{aligned}
 &= \text{Grauwert} + (\text{Grauwert} - \text{Mittelwert d. umgebenden Grauwerte}) \\
 &= \text{Grauwert} + \text{reiner Highpass} \\
 &= 2 \times \text{Grauwert} - \text{Lowpass}
 \end{aligned}$$

Grautonsprünge werden verstärkt durch Absenkung der niedrigeren und durch Anhebung der höheren, angrenzenden Grauwerte (Abb. 22). Entsprechend dem reinen Highpass werden bei kleinen Filtergrößen nur kleinräumige Änderungen verstärkt. Großflächige werden nicht verstärkt, behalten aber ihren ursprünglichen Grauwert.



4.3 Spezielle Untersuchungen zur Highpassfilterung im Bereich Markoy an panchromatischen Spot-Daten.

Für einen Ausschnitt des Arbeitsgebietes, südwestlich von Markoy, wurden dazu am panchromatischen Kanal von Spot-Simulationsdaten, hier mit einer Bodenauflösung von 20 m, spezielle Untersuchungen angestellt (Abb.23/24). Die Ergebnisse sind aufgrund der in diesem Fall vorliegenden gleichen Bodenauflösung auf die Spot-Spektralkanäle übertragbar.

4.3.1 Filtergröße und Strukturgröße

Wie nach der Theorie zu erwarten, zeigt die kleinst mögliche Filtergröße von 3×3 Pixeln (H3) nur die starken Grautonänderungen über Strecken < 60 m. Deutlich wird dies im SW des Bildes, wo die Ränder von NE-verlaufenden vegetationsbewachsenen Trockentälern verstärkt werden. Diese Trockentäler treten aber auch im einfachen panchromatischen Bild durch ihren starken Grautonunterschied hervor. Innerhalb der 100 - 300 m breiten Vegetationstreifen ist bei dieser Filtergröße keine Differenzierung möglich.

Unvorteilhaft wirkt sich diese Filtergröße in SE des Bildes aus, wo die Grautonänderungen über größere Distanzen erfolgen. Eine bessere Differenzierung zeigt dort ein möglichst großräumiger Filter (H 49, Mittelwertbildung über ca 1 km^2).

Große Filter führen jedoch zur Verbreiterung von natürlich eng-räumigen Grautonsprüngen.

Dieser Effekt ist im Mar von Markoy am E-Rand des Bildes erkennbar. Während sich die Kontrastverstärkung bei kleinen Filtergrößen nur auf wenige Pixel beschränkt, betrifft die Grauwertüberhöhung beim 49×49 Filter (H 49 u. AD49) bereits deutlich sichtbar eine einige 100 m breite Zone. Dieser Effekt kann leicht zu einer Fehlinterpretation, etwa zur Abgrenzung einer "Randzone" entlang des Doleritganges ganz im N des Bildausschnittes führen.

Die geeignetste Filtergröße liegt zwischen den beiden Extremen. Nach dem rein interpretativen Eindruck erscheint die 9×9 Filtergröße am klarsten und über den ganzen Bildausschnitt gesehen, sowohl im reinen, wie im Add-back-Highpass, am besten auflösend.

Dieses Ergebnis entspricht den theoretischen Erwartungen, denen zufolge die Filtergröße ungefähr gleich groß den zu verstärkenden Strukturen gewählt werden sollte.

Da diese Strukturen jedoch sehr unterschiedliche Größenordnungen aufweisen (Trockentäler sind hier 100 - 300 m breit) und schwer genau definierbar sind, kann die Filtergröße empirisch gewählt werden. Dazu müssen die zu verstärkenden Strukturen jeweils im Bild überprüft werden.

In diesem Fall sollten nicht nur die ohnehin interpretierbaren Ränder der Trockentäler verdeutlicht werden, sondern eher die schwächeren und kleineren Strukturen an der NE-Ecke der Ranch von Markoy oder um das Dorf Salmossi im SW-Eck. Die Filtergröße von 180 x 180 m (9 x 9 Pixel) liefert dafür das beste Ergebnis (Abb.22 u. 23).

4.3.2 Filtergröße und Grauwertverteilung

Ein weiteres Kriterium für die Wahl der Filtergröße liegt in der Veränderung der Histogramme durch die Filterung.

Tab. 8: Anzahl der besetzten Grauwerte nach der Highpassfilterung

Grauwerte im unverarbeit. panchr. Kanal	Filter- größe (Pixel)	Anzahl der besetzten (<0,1%) Grauwerte	
		im reinen High- Highpass	im Add-back- Highpass
108	3 x 3	(H3) 37	(AD3) 98
108	9 x 9	(H9) 48	(AD9) 118
108	15 x 15	(H15) 60	(AD15) 124
108	49 x 49	(H49) 72	(AD49) 148
108	512 x 512	108	216

Der reine Highpass, wie auch der Add-back-Highpass zeigen mit steigender Filtergröße eine zunehmende Grauwertdifferenzierung. Inwieweit diese feinere Differenzierung gewünscht ist, hängt von der Höhe der Grautonsprünge ab, die verstärkt werden sollen. Nur wenige im reinen Highpass besetzten Grauwerte bieten nämlich eine größere lineare Nachstreckmöglichkeit.

Abb. 23-1 Verschiedene Highpass-Filtergrößen (H9 - H49),
angewandt auf den panchromatischen Spot-Kanal.
Das letzte Bild (HIP-S-9) ist vor der Highpass-
Filterung auf 20-230 vorgestreckt.

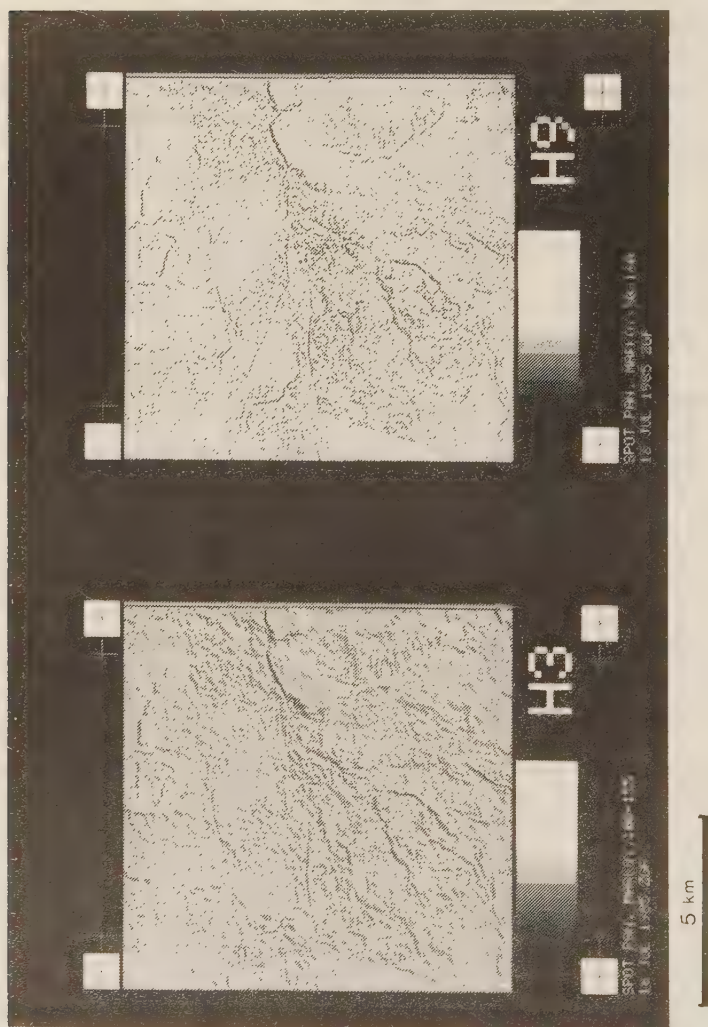


Abb. 23-2

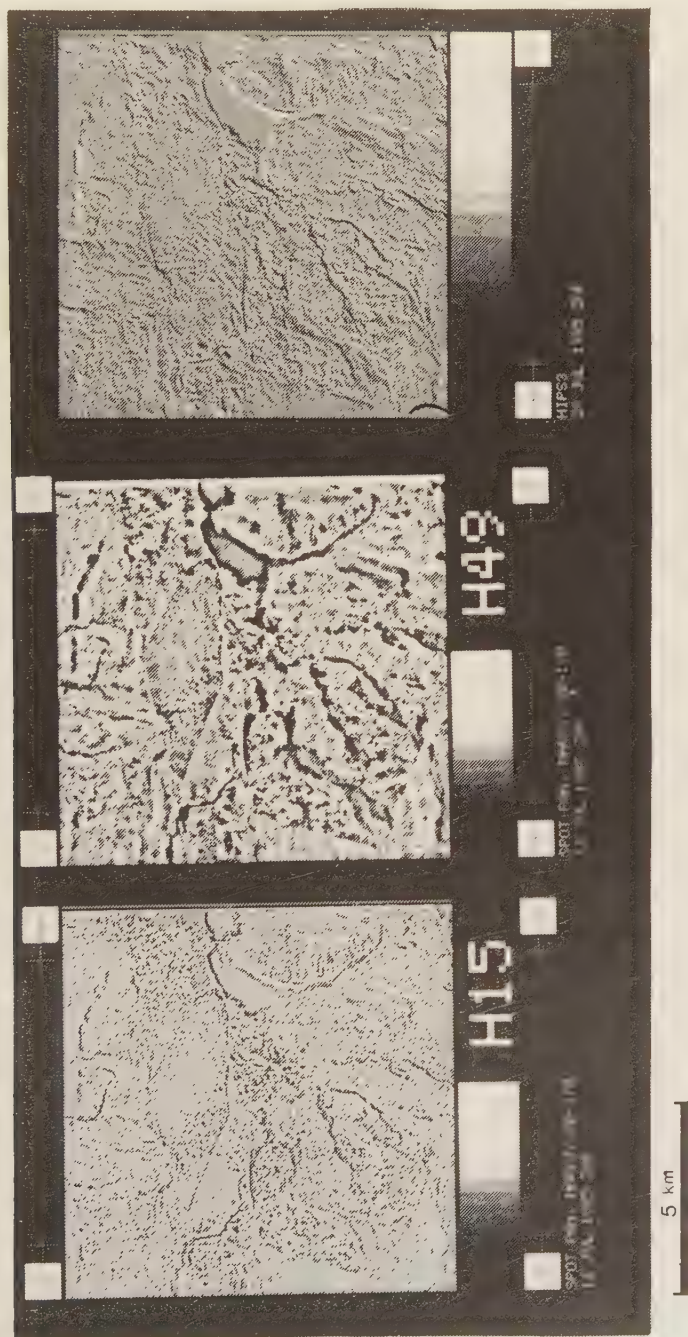


Abb. 24-1 Der panchrom. Spot-Kanal bei versch. Add-back-Highpass Filtergrößen (Spot-Pan; 3x3-Filter; 9x9-Filter)



Abb. 24-2 Der panchr. Spot-Kanal bei versch. Add-back-Highpass
Filtergrößen (15x15-Filter; 49x49-Filter; vorgestr. 9x9-Filter)



Bei z.B. nur 37 besetzten Grauwerten (H3) kann 1 Grautonschritt linear auf 6 Grautöne nachgestreckt werden; bei 72 (H49) im Highpass besetzten Grauwerten kann 1 Schritt nur noch auf 3 Grautöne nachgestreckt werden. Dieser Wert liegt schon unter dem vom Auge noch zu unterscheidenden minimalen Grautonunterschied. Im 3 x 3 Filter werden also höhere Grautonsprünge besonders verdeutlicht, geringe verschwinden.

Da sich die Lineamente, besonders in den sandbedeckten Flächen dieses Gebietes, nicht unbedingt durch starke Grautonunterschiede auszeichnen -im Bild sind dies eher die Grenzen Wasser/Land, Anstehendes/Sandbedeckung, starke Vegetation in Trockentälern /schwache auf den weiten, sandigen Ebenen- soll das Ergebnis der Highpassfilterung die geringen Grautonunterschiede in diesen sandbedeckten Ebenen verstärken und die Interpretationsmöglichkeit dort verbessern.

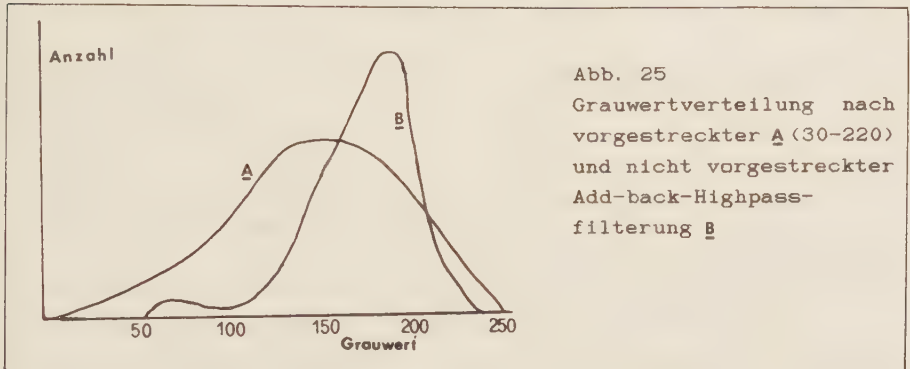
4.3.3 Vorgestreckter Add-back-Highpass

Durch die Wahl der Filtergröße von 9 x 9 Pixeln (Kap. III-4.3.1) ist das entstehende Grautonspektrum bereits auf 48 (H9), bzw. 118 (AD9) Graustufen beschränkt.

Daher muß ein neuer Weg gefunden werden, innerhalb der strukturgrößenabhängigen Kontrastverstärkung spektral fein zu differenzieren.

Dies gelingt durch das lineare Vorstrecken des Originalbildes von 108 auf 256 Graustufen im Highpass und auf 210 (20-230) Graustufen im Add-back-Highpass. Das Histogramm dieser Add-back-Filterung zeigt ohne lineares Nachstrecken nahezu eine Gauß-Verteilung unter vollständiger Ausnutzung der 256 Graustufen (Abb. 25).

Der entscheidende Unterschied, ob vor oder nach der Filterung gestreckt wird, liegt in der Anzahl der tatsächlich besetzten Grauwerte. Mit der üblicherweise verwendeten linearen Nachstreckung der Highpassbilder wird zwar ebenfalls das gesamte SW-Spektrum ausgenutzt, besetzt ist aber nur jeder 2. Grauwert. Eine feine Grauwertdifferenzierung geht durch Auf- und Abrunden der bei der Mittelwertbildung entstehenden Dezimalzahlen auf in diesem Fall 108, anstatt auf 256 durch Vorstrecken mögliche, verloren.



Diese bestmögliche Grauwertdifferenzierung ist besonders wichtig für Farbdarstellungen und die digitale Weiterverarbeitung. Weniger entscheidend ist sie bei der direkten Abspielung für ein Schwarz-Weiß Bild auf Papier, weil, wie beschrieben, weder das Papier, noch das Auge, eine solch feine Grautondifferenzierung erlaubt.

Die Highpassfiltergröße von 9 x 9 Pixeln, entsprechend der Bodenauflösung von 180 x 180 m, mit linearer Vorstreckung wurde bei den Farbdarstellungen der Spot-Simulationsdaten (Bild 6-9) verwendet.

Jeder Farbkanal wurde dabei einzeln gefiltert und kontrastverstärkt.

Die für die Highpassfilterung optimale Filtergröße läßt sich auf anders auflösende Systeme (z.B. Landsat) nicht übertragen oder umrechnen.

Erstens liegt die kleinst mögliche Filtergröße bei MSS-Daten bei 240 x 240 m .

Zweitens zeigen anders auflösende Aufnahmen eine ganz andere Größenordnung von Oberflächenphänomenen, so daß die Filtergröße speziell den im Bild enthaltenen Phänomenen angepasst sein muß.

Für die kommenden Spot-Satellitendaten jedoch wird sich diese Filtergröße im Sahel anwenden lassen.

Beim panchromatischen Kanal mit der Auflösung von nur 10 m ist sie noch weiter zu optimieren .

4.4 Hauptachsentransformation

Die Berechnung der Hauptachsen ist u. a. bei Siegal, Gillespie (1980) detailliert beschrieben.

Das Verfahren dient einer Datenreduktion von mehreren Spektralkanälen auf eine einzige Datenebene mit möglichst geringem Informationsverlust.

Die Reflexionsinformation aller Spektralkanäle wird dabei auf jeweils ein Grautonbild komprimiert, wobei die Darstellung der 1. Hauptachse den größten Kontrast, im allgemeinen die Helligkeit, wiedergibt. Die 2. und die weiteren Hauptachsen zeigen eher die Farbunterschiede der Oberfläche.

Mit dem Interpretationsziel der verbesserten Strukturerkennung ist die 1. Hauptachse die interessanteste.

Sie wurde sowohl bei den Landsat-, als auch bei den Spot-Simulationsdaten für das Arbeitsgebiet berechnet. Dabei hat sich gezeigt, daß die Haupthelligkeitsunterschiede fast ausschließlich auf Vegetationsunterschiede zurückzuführen sind. Die dichter vegetationsbedeckten Trockentäler heben sich stark hervor. Auch Anbauflächen auf den Dünen lassen sich in der 1. Hauptachse sehr gut unterscheiden.

Bei Überlagerungen, die eine Vegetationsinformation dieses Gebietes enthalten sollen, bietet sich die 1. Hauptachse als Intensität in einer IHS-Verarbeitung (Kap. III-6.4.3) an. Problematisch kann dabei allerdings die Unterscheidung sehr dichter Vegetation von Lateritkuppen oder dem Anstehenden werden, die in der 1. Hauptachse gleich erscheinen.

Inwieweit daher die Datenreduktion von mehreren Spektralkanälen auf eine SW-Informationsebene bei der Vegetationsdarstellung sinnvoll ist, bleibt zu untersuchen.

Bei den Spot-Satelliten-Daten wird ein highpassgefilterter panchromatischer Kanal, aufgrund seiner Auflösung von nur 10 m mehr an Strukturinformation enthalten, als die 1. Hauptachse der drei nur mit 20 m auflösenden Spektralkanäle.

5. Untersuchungen zur Darstellung der Vegetation aus Landsat MSS-Daten

5.1 Übersicht

Die Vegetation ist sowohl von ihrer Dichte als auch von ihrer Artenvielfalt sehr gut als Indikator für Bodenfeuchte, Bodenwasserspeichervermögen, Niederschlagshäufigkeit, evtl. Tiefe und Ausdehnung eines oberflächennahen Grundwasserkörpers und für andere hydrogeologische Parameter geeignet.

Grundsätzlich lassen sich im Satellitenbild sowohl verschiedene Vegetationstypen, als auch die Dichte des Bewuchses unterscheiden. Je nach Spektralkanälen und räumlichem Auflösungsvermögen müssen dazu jedoch bestimmte Bedingungen erfüllt sein:

- * das spektrale Reflexionsverhalten verschiedener Vegetationsarten muß sich zumindest in einem Kanal unterscheiden.
- * vegetationsbedeckte Oberflächen müssen zumindest so dicht bewachsen sein, daß sich ihr Reflexionsverhalten in einem Kanal von dem unbewachsenen Oberflächen unterscheidet.
- * die vegetationsbedeckten Flächen sollten ausreichend groß sein. Günstig sind Flächen größer als 2×2 Pixel.

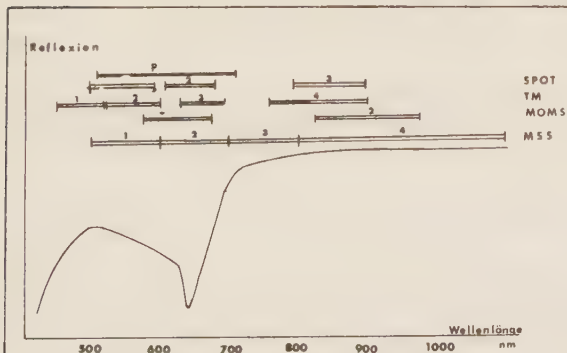
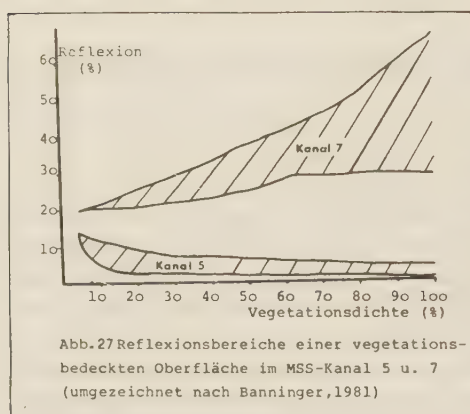


Abb.26 Reflexionskurve vegetationsbedeckter Oberflächen und Spektralkanäle verschiedener Aufnahmesysteme

Die Reflexionskurve ist stark generalisiert. Sie differenziert nicht die verschiedenen Chlorophylle und anderen Pigmentkörper. Sie geht zudem von vollkommener Vegetationsbedeckung aus.

Abb. 26 zeigt, daß die Landsat MSS - Kanäle erstens sehr breit gewählt sind und zweitens die Minima und Maxima der verallgemeinerten Vegetationsreflexionskurve nicht sehr exakt abdecken. Trotzdem läßt sich bei genügender Dichte und ausreichendem Chlorophyllgehalt die Vegetation im Ratio MSS 5/7 recht gut von vegetationslosen Oberflächen unterscheiden.



Mit steigender Vegetationsdichte steigt die Reflexion im NIR - und fällt im Rot - Bereich (Abb. 27). Diese Abhängigkeit der Reflexion von der Vegetationsdichte ist bei Banninger (1981) und Bunnik (1978) ausführlich beschrieben.

5.2 Darstellung der Januarvegetation im Sahel

5.2.1 Allgemeines

Nahezu alle in der Literatur beschriebenen und angewandten Bildverarbeitungsmethoden zur Vegetationsdarstellung gehen von dem oben genannten spektralen Verhalten aus.

Für die Vegetation unserer Breiten, sowie die der tropischen und subtropischen Breiten und zur Regenzeit auch für die der ariden und semiariden Gebiete trifft dieses Spektralverhalten zu, nicht aber für die semiariden Gebiete während der Trockenzeit.

Im Arbeitsgebiet läßt sich im üblicherweise verwendeten Ratio 5/7 in einer Januaraufnahme - also 4 Monate nach Ende der Regenzeit - nur noch die relativ dichte Baumvegetation in den Trockentälern und um die Mare erkennen. Der gesamte übrige Bereich erscheint in dieser Verarbeitung vegetationslos.

Die Gründe dafür sind folgende:

1. Der Baumbestand, der in den Trockentälern das übliche Reflexionsverhalten zeigt, ist in allen anderen Gebieten nicht oder zu spärlich vorhanden, um ein spezifisches, von der Bodenreflexion unterschiedliches, spektrales Verhalten zu zeigen.
2. Die vorhandene, niedere Vegetation, wie Dornbüsche und Gräser zeigen kaum (noch) grüne Farben. Die zu diesem Zeitpunkt nahezu verdorrte, chlorophyllarme Vegetation weist

nicht mehr die starke Reflexion im NIR - Bereich auf.

3. Die vorhandene Vegetation ist stark mit Staub bedeckt, so daß die Grün - und NIR - Reflexion weiter gemindert wird.
4. Der gras- und buschbewachsene Anteil der Oberfläche liegt häufig unter 10 %. Die gemessene Reflexion ist über jedes Pixel gemittelt. Der Reflexionsunterschied eines zu 10 % vegetationsbedeckten Meßfeldes zu einem vegetationslosen ist nur minimal (bis max. 3 Grauwerte bei 10 % Bedeckung).
5. Der Kanal 7 der Landsat Daten des Eros - Datencenters ist im Gegensatz zu den mit 7 bit kodierten Kanälen 4 - 6 nur mit 6 bit kodiert. Seine Dynamik liegt deshalb nur bei ca 20 Grauwerten (40 - 50 in Kanal 4 - 6; vgl. Abb. 37). Die minimale Reflexionsänderung durch schwache Vegetationsbedeckung kann deshalb im Kanal 7 nicht mehr unterschieden werden.

Die am häufigsten verwendete Darstellungsform, die STANDARD-FALSCHFARBEN - Verarbeitung (Kanal 4, 5, 7, als blau grün, rot) kann aus diesen Gründen in diesem Gebiet ebenfalls nur einen Teil der Vegetation, nämlich die dichte Baumvegetation, deutlich zeigen. Auf den Dünen dagegen kann Vegetation nur noch durch textuelle Unterschiede vermutet werden.

Aber auch diese spärliche Buschvegetation und die schnell vertrocknende Grasvegetation lassen noch wichtige Aussagen zu:

- Die vegetationsbedeckten Flächen haben das Bodenwasser länger gespeichert als die vegetationslosen.
- Vegetationsbedeckte Bereiche können auf sonst kaum meßbare, evtl. nur unter der Sedimentbedeckung vorhandene, morphologische Unterschiede hinweisen und somit Punkte erhöhter Infiltration indizieren.
- Unterschiedlich bewachsene Flächen können auf unterschiedliche Bodentypen zurückzuführen sein und auf evtl. wasserwirksame, sedimentbedeckte geologische Grenzen hinweisen.

- Die schwach grasbewachsenen Abschnitte in den sandbedeckten Bereichen zeigen wahrscheinlich eine andere, porenwasser-speicherndere Kornfraktionierung mit kurzzeitig höherer Bodenfeuchte. Sie eignen sich bei flächenhafter Ausdehnung damit eher für den kurzzeitigen Hirseanbau als andere. Bei deutlicher Längserstreckung weisen sie auf oberflächige Abflußwege während der Regenzeit hin und können somit Infiltrationszonen vermuten lassen.

Um diese Indizierungsmöglichkeiten nicht gänzlich unbearbeitet zu lassen, muß eine andere Verarbeitungsmöglichkeit, speziell zur Darstellung dieser spärlichen Vegetationsbedeckung gefunden werden.

5.2.2. Verbesserte Darstellung der spärlichen Busch - und Grasvegetation

Um trotz der genannten Schwierigkeiten schwach vegetationsbedeckte Gebiete als solche identifizieren zu können, wurden zunächst in einem Testbereich mit bekannter Vegetationsbedeckung die Reflexionseigenschaften in den 4 Aufnahmekanälen untersucht (Abb. 37).

Bei diesen Untersuchungen fällt im roten und NIR - Bereich die extrem starke Reflexion des Dünenandes auf, stärker auch als in den hauptsächlich mit fluviatilen (während der Regenzeit verfrachteten) Sanden bedeckten Bereichen. Entscheidend ist, daß beide Sande auch im NIR - Bereich stärker reflektieren als bekannte vegetationsbedeckte Flächen. Diese Vegetationsbedeckung wirkt sich also mindernd auf die sonst starke Sandreflexion aus. Dieser Effekt kann verwendet werden, nicht nur um vegetationsbedeckte von vegetationslosen Flächen zu unterscheiden, sondern in beschränktem Maße sogar zur Bestimmung des Bedeckungsgrades durch unterschiedlich starke Reflexionsminderung.

Die in dem Testgebiet mit bekannter Vegetation gemessenen Grauwerte können selektiert (Abb. 37/38) und beispielsweise durch Unterlegung mit Farbe verdeutlicht dargestellt werden (Kap. III-8).

Bei der Auswertung ist dabei zu beachten, daß diese speziell selektierten Grauwerte zunächst dem Mischsignal eines speziellen Bodentyps mit definierter Vegetationsart und - dichte entsprechen.

Erst durch die Kontrolle in anderen Gebietsabschnitten zeigt sich wie genau die Gras - und Buschvegetation indizierenden Grauwerte von anderen getrennt werden konnten.

Die Messung der Grauwerte und die daraus ermittelten Spektralkurven lassen sich nicht direkt auf andere Gebiete oder Aufnahmesysteme, vor allem aber nicht auf andere Jahreszeiten übertragen. Der Grad der Reflexionsminderung durch Bedeckung mit vertrockneter oder sehr chlorophyllarmer Vegetation muß jeweils neu ermittelt werden.

Abb. 28-1 Verarbeitungen zur Vegetationsdarstellung (vgl. S.90)
(MSS Kanal 7 vom Jan. u. April 1976)

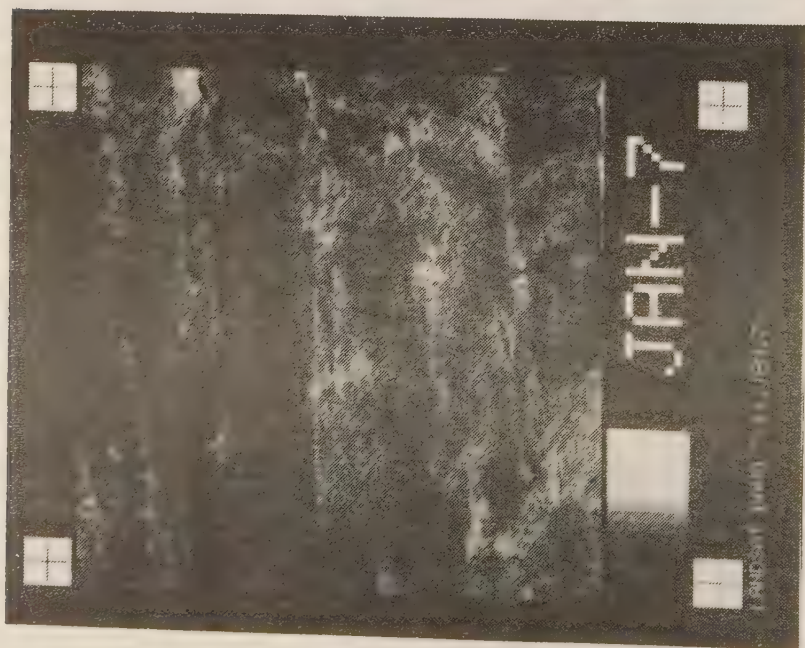
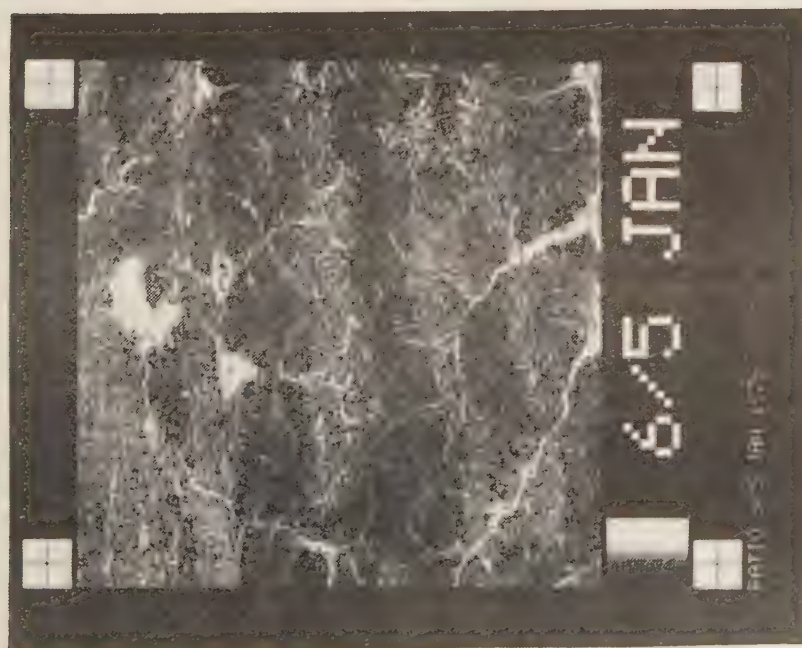
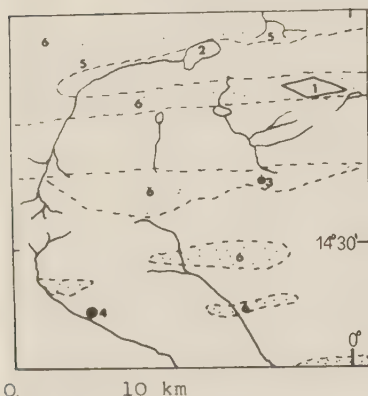


Abb. 28-2 Verarbeitungen zur Vegetationsdarstellung (vgl. S. 90)
(MSS Ratio 6/5 vom Jan. und April 1976)



10 km

Abb. 28 Vegetationsdarstellung für Januar und April aus den Landsat MSS-Kanälen 7, bzw. den Ratios MSS6/MSS5



Die auf der vorigen Seite abgebildeten Verarbeitungen von Januar- und Aprilszenen haben jeweils gleiche Streckparameter, mussten photographisch jedoch unterschiedlich lange belichtet werden (Graukeile). Reflexionsunterschiede blieben trotzdem gewahrt.

links: Lageskizze der Bildausschnitte (1)-Markoy-Ranch, (2) Darkoy-Mar, (3)-Salmossi, (4) - Gorom-Gorom, (5)-abgeerntete Hirsefelder, (6)-Dünensandbereiche

Die üblicherweise verwendeten Verarbeitungen von MSS-Daten zur Vegetationsdarstellung liefern im Sahel folgende Ergebnisse:

MSS Kanal 7

- * Im April ist die Reflexion im Kanal 7, wie in allen anderen Kanälen, durch den höheren Sonnenstand, größer als im Januar.
- * Dünensandbereiche (Abb 28-6) reflektieren stärker (heller), als die mit fluviatilem Sand bedeckten Gebiete.
- * Reflexionsunterschiede (Kontraste) zwischen Trockentälern und ihrer Umgebung sind im Januar durch die noch dichtere Vegetation größer als im April.
- * Die dichter vegetationsbedeckte Markoy-Ranch (Abb 28-1) reflektiert schwächer als die weniger dicht bewachsene Umgebung mit Dünensandbedeckung.
- * Abgeerntete Hirsefelder im Dünensandbereich (Abb 28-5) reflektieren so stark, wie der vegetationslose Dünensand.
- * Im April hat die reflektionsmindernde Wirkung der Vegetation auf die Sandbedeckung gegenüber dem Januar nachgelassen. Die Kontraste sind schwächer. Das Mar bei Darkoy (Abb 28-2) ist im April sehr viel kleiner, als im Januar.

Ratio MSS6/MSS5

- * Vegetation mit typischem Reflexionsverhalten kann nur in den Trockentälern interpretiert werden.
- * Im Januar verhält sich nur die Reflexion der Trockentalvegetation wie die des Chlorophylls: stärkere Reflexion im Band 6, geringere im Band 5, d.h. hohe Werte (hell) im Ratio.
- * Im April zeichnet sich selbst die Trockentalvegetation in dieser Darstellung kaum noch ab.
- * Lediglich um das Mar von Darkoy (Abb 28-2) hält sich im April noch genügend Vegetation mit Chlorophyllreflexionseigenschaften.
- * In beiden Ratios ist die Busch- und Grasvegetation der Markoy-Ranch (Abb 28-1) kaum zu interpretieren.

5.3 Darstellung von Vegetationsunterschieden in verschiedenen Jahreszeiten.

In einer digitalen Verknüpfung von Satellitenbildern unterschiedlicher Aufnahmedaten können die Reflexionsunterschiede zwischen den beiden Szenen dargestellt werden.

Je nach thematischer Zielsetzung und Klimazone wird dabei Aufnahmezeitpunkt, zeitlicher Abstand zur nächsten Aufnahme und die Gesamtzahl der benötigten Aufnahmen gewählt. Zur Erntabschätzung in den semiariden Gebieten Westafrikas sind regelmäßige Aufnahmen alle 2 Wochen die ganze Vegetationsperiode über am günstigsten.

Für Fragestellungen in der Hydrogeologie sind die Aufnahmen aus der Trockenzeit weit aussagekräftiger. Während in der Regenzeit fast das gesamte Gebiet mit schwacher Grasvegetation überzogen ist, sind nach zwei Monaten Trockenzeit nur noch die relativ feuchteren Zonen bewachsen. Mit andauernder Trockenheit verkleinern sich diese Zonen immer weiter und liefern erst in diesem Stadium die wichtigen Hinweise auf Bodenwasserspeicherung oder ein eventuell vorhandenes Klufwassersystem.

Sogenannte Multitemporalverarbeitung sollen daher Zonen mit geringstem Vegetationsunterschied zwischen Anfang/Mitte und Ende der Trockenzeit besonders hervorheben.

Bei der Anwendung dieser Multitemporalverarbeitungen im Sahel treten allerdings eine Reihe von Besonderheiten und Schwierigkeiten auf:

- Der Reflexionsunterschied in Aufnahmen verschiedener Jahreszeiten beruht nicht nur auf unterschiedlicher Vegetationsbedeckung. Der wesentlich höhere Sonnenstand im April (80° gegenüber 52°) bedingt eine wesentlich höhere Reflexion in allen MSS-Kanälen (Abb. 28, Kanal 7 vom Jan. u. April).
- Um reine Vegetationsunterschiede, d.h. nur die Unterschiede im Reflexionsverhalten der Vegetation, beispielsweise durch Austrocknung bedingt, messen und darstellen zu können, muß zunächst das Reflexionssignal der Vegetation von dem des Bodens unterschieden werden. Wie beschrieben ist dies mit den üblicherweise verwendeten Bildverarbeitungsmethoden nur zur Regenzeit und in den relativ dicht bewachsenen Trockentälern möglich (Ratio 6/5).

- Die beschriebene Vorgehensweise zur Vegetationsdarstellung außerhalb der Trockentäler durch Herausfiltern bestimmter Grauwerte (S. 87) ist für Multitemporalverarbeitungen kaum geeignet, da sie auf einem Mischsignal aus Vegetations- und Bodenreflexion beruht.

Multitemporale MSS-Verarbeitungen können daher im Sahel Burkina Fasos nur Vegetationsunterschiede während der Regenzeit oder in den Trockentälern sicher zeigen.

Aufgrund der nur sehr geringen Reflexionsunterschiede der Januar- und Aprilvegetation, ergibt eine Differenzbildung der Vegetationsdarstellungen (6/5Januar - 6/5April) oder eine Division (6/5Januar / 6/5April) nur eine zu geringe Anzahl von besetzten Grauwerten, um die nötige Differenzierbarkeit zu erhalten.

Daher wurden die beiden Darstellungen in einer additiven Farbmischung überlagert.

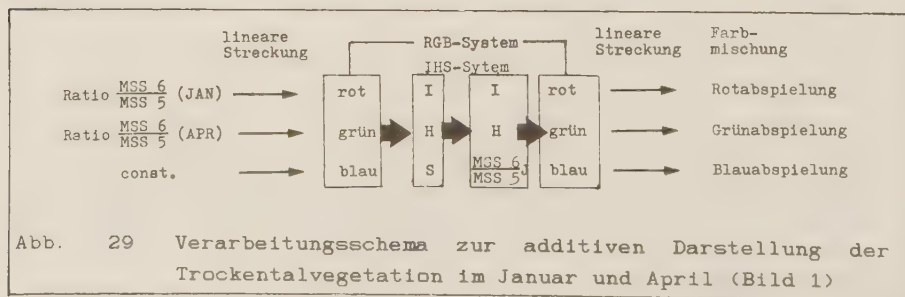
Empirisch ergab sich die Überlagerung der Januarvegetation als rot und der Aprilvegetation als grün als am geeignetsten. Der blaue Farbanteil ist über das gesamte Bild konstant.

Eine solche additive Farbmischung erfolgt rechnerisch durch eine Transformation in das IHS-Farbsystem.

Bei der Rücktransformation ins RGB-System zur Bildausgabe wurden Farbe und Intensität beibehalten (Abb. 29).

Als Farbsättigung wurde nochmals das Januarvegetationsratio 6/5 verwendet. Dadurch erscheinen im Januar vegetationslose Gebiete in ungesättigten Farben, während die Vegetationsbedeckung im Januar satte Farben annimmt.

Eine Fehlinterpretation durch im April auftretende stärkere jedoch vegetationsunabhängige Reflexion sollte dadurch vermieden werden.



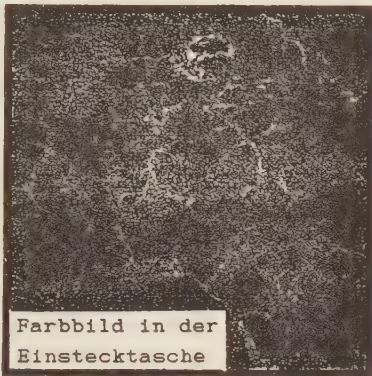


Bild 1;
Vegetationsunterschied in der
Trockentalvegetation, dargestellt
durch eine additive Farbmischung

rot = größte Änderung zwischen
Januar- und Aprilvegetation
gelb = Aprilveg. gleich stark wie
Januarveg.

Die Verarbeitung ist nur für die
Trockentäler interpretierbar.

Grundsätzlich sind multitemporale Vegetationsdarstellungen für den Sahel, außerhalb der Vegetationsperiode, schwierig zu verarbeiten und ihre Interpretationsmöglichkeit ist sehr beschränkt.

5.4 Zusammenfassung

Vegetationsbedeckte Oberflächen im Sahel zeigen in MSS-Fernerkundungsaufnahmen nur für kurze Perioden und nur für einen Teil der Vegetation die gewohnten Reflexionseigenschaften. Nach diesen Reflexionseigenschaften in den MSS-Kanälen lassen sich, von den Anbauflächen abgesehen, 2 Vegetationsgruppen unterscheiden, die Baumvegetation in den Trockentälern und die Dornbusch- und Steppenvegetation in den Ebenen und den Dünen.

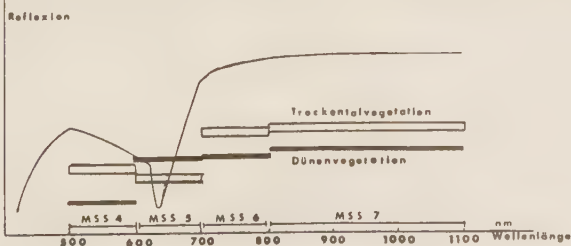


Abb. 30: Theoretisches Reflexionsverhalten von Chlorophyll und aus den Landsat-MSS-Kanälen gemessenes Reflexionsverhalten von Trockental- und Dornbuschvegetation.

Die dichte Baumvegetation zeigt bei Messungen in den MSS-Kanälen zumindest tendenziell eine Annäherung an die Chlorophyll-reflexionskurve (Abb.30). Die Ratios 7/5 und 6/5 (Abb. 28), sowie das Falschfarbenbild sind für die Darstellung dieses Vegetationstypes geeignet.

Multitemporalverarbeitungen zur Darstellung des Vegetationsunterschiedes in der Trockenzeit aus MSS-Szenen ergeben nur für diesen Vegetationstyp anwendbare Ergebnisse.

Die in der Trockenzeit spärlich gras- und buschbewachsenen Ebenen zeigen ein vollkommen anderes Reflexionsverhalten, als die Trockentäler. Der Sprung von geringer zu hoher Reflexion zwischen Kanal 5 und 6 fehlt völlig. Eine starke Reflexion im Grünbereich ist nicht vorhanden (Abb. 30).

Die üblicherweise verwendeten Ratios 6/5 und 7/5 zeigen diesen Vegetationstyp gar nicht. Das Falschfarbenbild läßt ihn nur durch textuelle Unterschiede vermuten.

Da auch dieser Vegetationstyp Aussagen über agrarisch nutzbare oder hydrogeologisch interessante Bereiche liefern kann, muß er in einer besonderen Verarbeitung dargestellt werden.

Die vertrocknete Vegetation wirkt mindernd auf die starke Reflexion des sandigen Untergrundes. Durch Messung der Reflexionsminderung in einem bekannten Ausschnitt lassen sich einer bestimmten Vegetationsdichte bestimmte Reflexionswerte zuordnen.

Diese Grauwerte können gesondert z.B. als Farbe in Einzelkanälen dargestellt werden und so auf weitere Gebiete mit diesem Bedeckungsgrad hinweisen (vgl. Bild 3).

Sollen Ernteabschätzungen möglich sein, müssen diese auf der Basis von Multitemporalverarbeitungen aus der Regenzeit durchgeführt werden. Aufnahmesysteme mit einer höheren geometrischen Auflösung als die Landsat 1-3 Systeme sind dazu notwendig.

Abgeerntete Felder in den Dünenbereichen reflektieren, wie die vegetationslosen Flächen, sehr stark. Sie lassen sich durch ihren häufig rechteckigen Umriß innerhalb der schwächer reflektierenden, leicht bewachsenen Dünengebiete unterscheiden.

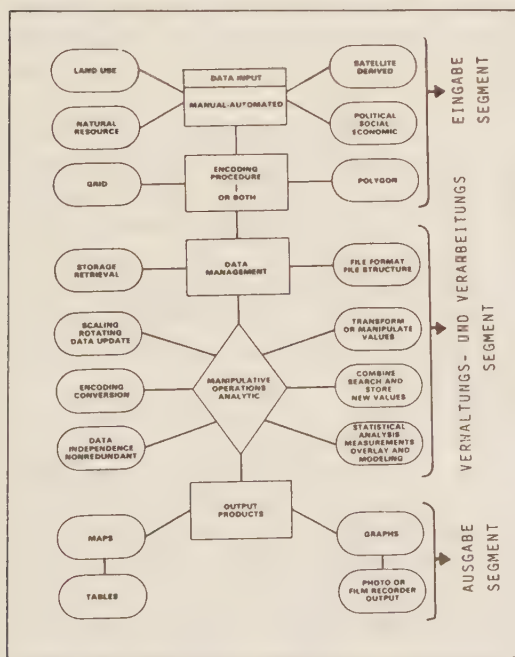
Grundsätzlich ist das Landsat MSS-System durch seine breiten Spektralkanäle zur Darstellung spärlicher Vegetationsbedeckung weniger geeignet. Die räumliche Auflösung von 80 x 80 m ist zur Unterscheidung kleiner, selbst vegetationsreicher Flächen von häufig weniger als 20 x 20 m um die Wasserstellen ungenügend.

6. Kombination von Fernerkundungsdaten mit geophysikalischen (aeromagnetischen) Daten

6.1 Einführung

Die Idee der Auswertung verschiedener, kombinierter Daten ist nicht neu. Schon Hettner (1934) entwickelte das Modell einer thematisch differenzierten Betrachtungsweise der Geographie. Dieses Modell thematischer Datensätze wird in den letzten beiden Jahrzehnten besonders im Bereich der Regional- und Umweltplanung in Form digitaler Datenhaltungssysteme -sogenannter Datenbanken- verwendet.

Aus diesen Systemen abgeleitet, entwickelten sich die geographischen Informationssysteme (GIS), die zusätzlich zum reinen Datenhaltungssystem ein Eingabe-, ein Datenmanipulations- und ein Ausgabesegment beinhalten.



In den letzten Jahren werden auch in der Geologie verstärkt Überlagerungen thematischer Datensätze eingesetzt. Besonders die digitale Verknüpfung von Satellitenbildern mit zusätzlichen Meß- oder Interpretationsdaten gewinnt zunehmend an Bedeutung. Führend in Europa auf diesem Gebiet sind u.a. das Trinity College, Dublin und die Technische Universität in Lingby, Dänemark (Conradson, Thyrtsted, 1985).

Abb.31 Struktur eines geographischen Informationssystems
(nach ESRI, 1982)

In der Geologie bisher bevorzugte Einsatzgebiete solcher geographischer Informationssysteme sind die Lagerstättenkunde allgemein und die Uranexploration im Besonderen und damit verbunden die Strukturgeologie. (u.a. Trautwein et al, 1982, O'Callaghan, O'Sullivan, 1982).

In all diesen Studien hat sich gezeigt, daß überlagerte Daten bei entsprechender Verarbeitung einfacher und geometrisch genauer zu interpretieren sind als die einzelnen, unverarbeiteten Daten.

Die Ergebnisse solcher Überlagerungen werden im Allgemeinen in Form kombinierter oder auch thematisch spezifizierter - immer jedoch bereits vorinterpretierter - Karten dargestellt. Lediglich Conradson u. Thyrssted (1985) haben dazu eine IHS-Darstellungsform gewählt, wobei allerdings auch in diesem Fall die Kodierung interpretierten, d.h. sekundären Daten (Lineamentdichten) entspricht.

Für die vorliegende Arbeit ist eine der Zielsetzungen diese Vorinterpretation bei der Verarbeitung und Integration der Daten so gering wie möglich zu halten. Die eigentliche Interpretation soll soweit als möglich dem mit dem Gelände vertrauten Anwender (Geologen) überlassen bleiben.

Dies bedeutet, daß das Verarbeitungsergebnis kaum in Form einer thematischen, abstrahierten Karte dargestellt werden sollte. Diese präsentiert dem Anwender die eigentlichen Meßdaten nur unvollständig und schränkt seine Interpretationsmöglichkeit erheblich ein.

Die thematisch relevanten Daten sollen so dargestellt und kombiniert sein, daß jeder Meßwertsatz vollständig, nicht vorinterpretiert, im Endprodukt enthalten und auch einzeln, nicht nur als Mischsignal, interpretierbar ist.

Die technischen Voraussetzungen eines GIS, ergänzt durch die digitale Bildverarbeitung, bieten dazu die Möglichkeit.

Das Eingabesegment (Input) dient in dieser Konzeption zunächst der Digitalisierung von Daten, die in Form von Karten, Profilen oder Statistiken vorliegen. Sodann erfolgt in diesem Segment die Überführung in ein einheitliches Speichersystem, hier in ein Rasterformat (Grid).

Im Datenverwaltungs- und Verarbeitungssegment werden die Daten weiter aufbereitet, z.B. Ausschnitte gewählt, Steigung, Exposition oder Statistiken berechnet.

Die in anderen Anwendungsbereichen ebenfalls in diesem Segment durchgeführten Kombinationen verschiedener Datensätze werden im vorliegenden Fall von der Bildverarbeitungssoftware übernommen. Diese ersetzt auch das Ausgabesegment des üblichen GIS, so daß die Endprodukte anstatt in Form von Karten als photographische Produkte vorliegen.

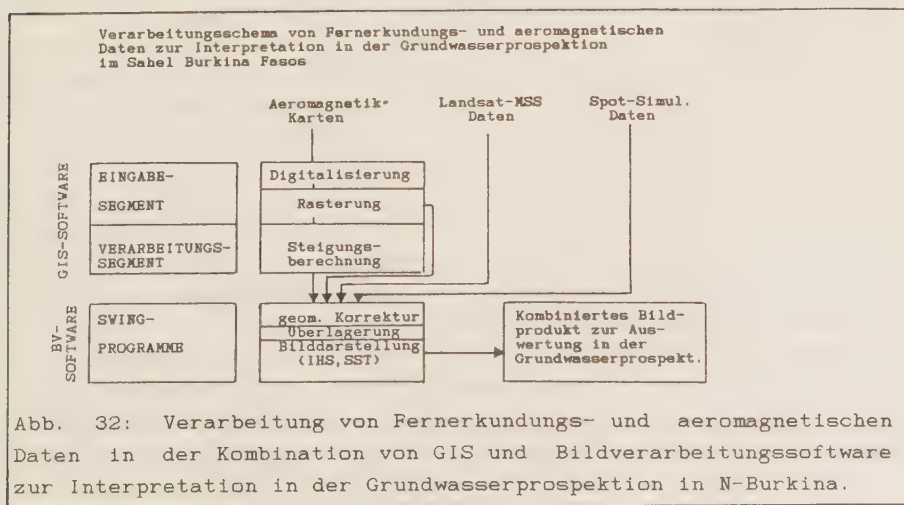
Im Arbeitsgebiet N-Burkina Faso wurden aus den vorhandenen Daten die hydrogeologisch aussagekräftigen und von der geometrischen Auflösung her kombinierbaren Daten ausgewählt.

Neben den Landsat-MSS-Daten waren dies nur Spot-Simulationsdaten und aeromagnetische Karten in den Maßstäben 1 : 200 000 und 1 : 50 000. Vorhandene geoelektrische Profile waren maximal 100 m lang und somit ungeeignet.

Mit der GIS-Software wurden die Isolinien der aeromagnetischen Karten digitalisiert und die Zwischenräume interpoliert (Abb. 34). Besonders zur Darstellung der grundwasserhöffigen Kontaktbereiche der Doleritgänge wurde die Steigung berechnet (Abb. 35).

Mit den SWING-Programmen der Bildverarbeitungssoftware (Fernandez, Haydn, Henkel, 1985) konnten verschiedene Darstellungsformen der überlagerten Daten unter Berücksichtigung der speziellen Interpretationsmöglichkeiten in Burkina getestet werden.

Nach der Geländekontrolle dieser Bildprodukte und ihrer Interpretation wurden einige besonders erfolgversprechende Verarbeitungsvorgänge grundlegend wiederholt und verbessert.



6.2 Das GIS-Softwaresystem

Die verwendete GIS-Software der Firma ESRI wurde beim bayerischen Umweltministerium und wird bei der Nationalparkverwaltung Berchtesgaden in den Bereichen Umwelt- und Regionalplanung eingesetzt. In seiner ursprünglichen Form eher für Großrechner ausgelegt, bestand das System aus 4 Segmenten:

- dem interaktiven Digitalisierungssegment (IDS),
- einem Polygonspeicher- und Überlagerungssegment (PIOS),
- dem Rasterspeicher- und Überlagerungssegment (GRID, GRD TOPO) und
- dem Auswertesegment (TOPO).

Da Datenüberlagerungen mit Fernerkundungsdaten immer ein Rasterformat verlangen, konnten die Segmente IDS und PIOS durch ein anderes, speziell entwickeltes Digitalisierungssegment ersetzt werden. Mit Hilfe dieses neuen Teilsegments werden die digitalisierten Punkte oder Linien durch eine Interpolation direkt in das Rasterspeicherformat überführt.

Das in Fortran IV arbeitende System wurde nach der entsprechenden Anpassung auf einem PDP 11/24 Rechner installiert.

6.2.1 Digitalisierung von thematischen Karten

Die Eingabe von Daten auf Kartenbasis erfolgt über einen Benson Digitalisiertisch (120 x 100 cm max. Kartengröße).

Zur Digitalisierung werden zunächst 4 Karteneckpunkte mit dem Digitalisierstift lokalisiert. Diesen 4 Punkten werden Zeilen- und Spaltennummern zugeordnet. Mit dieser Zuordnung werden Rastergröße und geometrische Auflösung (Pixelgröße) für die Digitalisierung festgelegt. Sodann wird jede Geometrie (Punkt, Linie, Isolinie) mit dem Digitalisierstift angesteuert und die entsprechenden Koordinaten registriert.

Jede digitalisierte Geometrie wird nummeriert. Nachdem alle Geometrien digitalisiert sind, wird im nächsten Arbeitsschritt jeder Geometrie ein sie beschreibender Wert (z.B. Meereshöhe in m oder die Magnetik in gamma) zugeordnet.

Der gesamte Digitalisierungsvorgang wird auf dem Bildschirm überwacht. Jede Geometrie kann einzeln, sowohl von ihrer räumlichen Lage, als auch von ihrem beschreibenden Wert her, korrigiert werden.

Weitere Rahmenbedingungen zur geometrischen Auflösung bei der Digitalisierung werden in Kap. III-6.3.3 beschrieben.

Die Überführung der digitalisierten Linien oder Punkte ins Rastersystem erfolgt durch Interpolation von Zwischenräumen oder durch Zuordnung des konstanten Linienwertes für einen umrandeten Bereich.

6.2.2 Interpolation

Im Gegensatz zur Speicherung bereits interpretierter Daten, die üblicherweise aus definierten Flächen mit einem gemeinsamen beschreibenden Wert aufgebaut sind, sollen in diesem Fall echte Meßwerte ohne Interpretation dargestellt werden. Zwischen den Einzelmeßwerten muß ein kontinuierlicher Übergang errechnet werden.

Die ESRI-Software erreicht dies durch Mittelwertbildung aus den 3 nächstgelegenen definierten Gitterpunkten im CONGRD-Programmschritt. Diese Interpolation ist erfahrungsgemäß sehr rechenzeitaufwendig (vgl. Kap. III-6.3.3).

Die Interpolation ist mathematisch definiert und reproduzierbar. Sie ist deshalb nicht als "Interpretation" zu betrachten.

Das bei der Interpolation berechnete Datenfile kann

- in der GIS-Software weiterverarbeitet werden oder
- in die Bildverarbeitungssoftware eingelesen und dort weiterverarbeitet werden oder
- über die Bildverarbeitungssoftware direkt als Grautonbild ausgegeben werden.

6.2.3 Steigungsberechnung

Das Datenverarbeitungssegment GRDTOPO bietet u. a. die Möglichkeit der Steigungsberechnung. Alternativ kann die größte positive Steigung, der Betrag der größten Steigung oder die mittlere Steigung aus den 4 oder 8 angrenzenden Gitterpunkten berechnet werden. Das Ergebnis gibt den Betrag der errechneten Steigung in % wieder.

6.3 Anwendung eines GIS zur Überlagerung von aeromagnetischen Daten mit Satellitendaten

6.3.1 Übersicht

Die aeromagnetischen sind die einzig hydrogeologisch anwendbaren, geophysikalischen Daten, die mit ausreichender geometrischer Auflösung und gleichzeitig flächendeckend im Departement Sahel vorliegen.

Um diese Karten der Maßstäbe 1 : 200 000 und 1 : 50 000 den Landsat- und Spot - Simulationsdaten zu überlagern, wurden sie in der beschriebenen Weise in ein digitales Rasterformat überführt. Digitalisiert wurden:

- zur Überlagerung mit Landsat-MSS Daten ein 40 x 40 km abdeckender Ausschnitt zwischen Gorom-Gorom und Markoy. Die durch Systemparameter begrenzte, minimale "Äquidistanz" bei der Digitalisierung betrug 50 gamma. Der minimale beschreibende Wert lag bei 33 000 gamma, der maximale bei 33 750 gamma. Die erreichte geometrische Auflösung betrug 250 x 250 m, d.h. das Raster umfasste 160 x 160 Pixel. Die Rechenzeit zur Interpolation dieser Karte mit 4 500 digitalisierten Werten betrug auf dem PDP 11/24 Rechner 26 Stunden.
- zur Überlagerung mit den Spot-Simulationsdaten zunächst 2 Ausschnitte von je ca 5 x 8 km und 103 x 153 Bildpunkten, was einer geometrischen Auflösung von 50 m entspricht. Die Isolinienabstände betrug 20 gamma.
- nach der Geländekontrolle und den ersten Auswertungen für den gesamten Spot-Simulationsausschnitt eine Fläche von 20 x 6 km mit 400 x 120 Bildpunkten und der geometrischen Auflösung von 50 m.
Alle in der aeromagnetischen Karte (1 : 50 000) eingezeichneten Isolinien in 10 gamma-Schritten wurden erfasst. Die beschreibenden Werte lagen zwischen 33 520 und 33 760 gamma (Abb. 33).

Abb. 33 Isomagnetische Konturlinien, die für die Digitalisierung herangezogen wurden (in Gamma + 33 000 Gamma; Isolinien-
distanz: 20 Gamma).

Die Isolinien sind der aeromagnetischen Totalintensitäts-
karte (Terra Surveys, 1977) entnommen (Flughöhe 150m,
Profillinienrichtung N-S, Profillinienabstand 500m;
vgl. S. 52).

Die Interpretation ist ebenfalls Terra Surveys (1977)
entnommen.

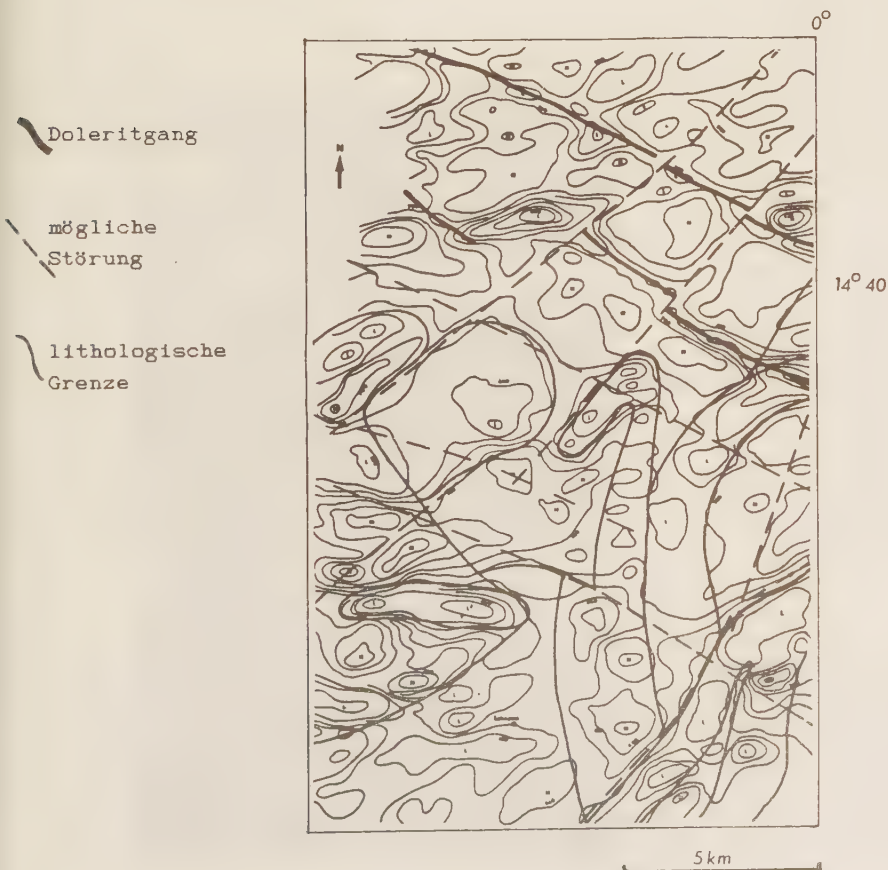
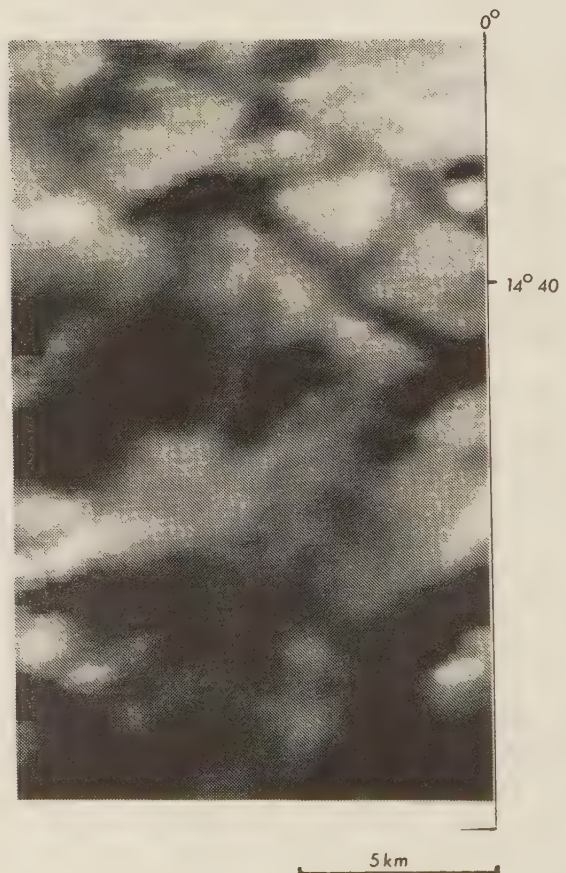


Abb. 34 Qualitative Darstellung der digitalisierten und interpolierten magnetischen Isolinienkarte (vgl. Abb. 33) als Grautonbild.

Weiß=Maximum (33 760 Gamma); Schwarz=Minimum (33 520 Gamma)



Bei dieser letzten Digitalisierung wurde die geometrische Auflösung der vorhergegangenen Digitalisierung beibehalten, die Zahl der digitalisierten Isolinien aber nahezu verdoppelt.

Die geometrische Genauigkeit von 50 m Auflösung war deshalb ausreichend, weil bei der Befliegung die Totalintensität nur alle 150 m gemessen worden war und die Isolinien somit bereits Interpolationsergebnisse darstellten.

Durch Erhöhen der Anzahl der digitalisierten Linien dagegen konnte eine wirkliche Verbesserung in der Genauigkeit der Interpolation erzielt werden.

Probleme waren bei räumlichen Isolinienabständen von mehr als 10 Pixeln entstanden. Das interpolierte Grautonbild zeigte in diesen Bereichen Stufen, d.h. zu große und zu schlecht interpolierte Grautonänderungen. Diesem Problem hätte auch durch eine Verringerung der Pixelanzahl, allerdings auf Kosten der räumlichen Auflösung, abgeholfen werden können.

Durch die Erhöhung der Zahl der digitalisierten Linien konnte gleichzeitig die zur Interpolation benötigte Rechenzeit um $1/3$ verkürzt werden. Diese zunächst erstaunlich erscheinende Verkürzung der Rechenzeit ist auf den verwendeten Interpolationsalgorithmus zurückzuführen. Die 3 nächsten besetzten Gitterpunkte werden anfangs nur in der benachbarten Zeile und Spalte also aus 8 Gitterpunkten gesucht; sind diese unbesetzt werden 2 Zeilen und Spalten in jede Richtung, also bereits 24 Gitterpunkte untersucht, bei 3 Zeilen 48 Gitterpunkt, bei 4 : 80 usw. Bei dicht liegenden Isolinien werden die benötigten 3 besetzten Gitterpunkte schneller gefunden und interpoliert.

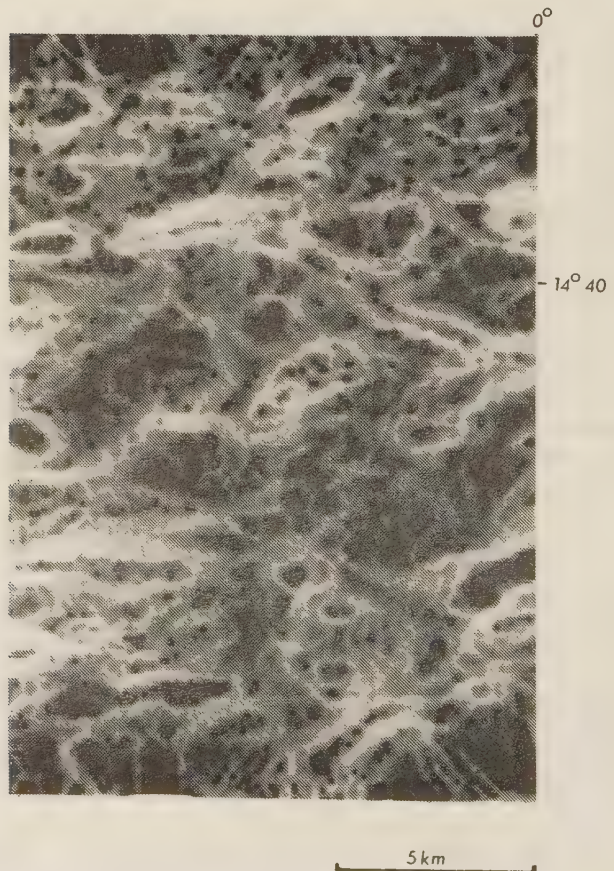
6.3.2 Steigungsanalyse

Nach Buckley (1983), Terra Surveys (1977), Bosum (1981) und den Vergleichen magnetischer und geoelektrischer Bodenprofile (Kap. II-4) wird deutlich, daß Störungen des Gesteinsverbandes, lithologische Grenzen und Gangintrusiva in dieser magnetischen Breite häufig mit einer über längere Strecken geradlinig verlaufenden Änderung der magnetischen Meßwerte verbunden sind. Eine lithologische Grenze kann über längere Strecken parallel zu den isomagnetischen Linien verlaufen.

Ein Doleritgang im N des Arbeitsausschnittes zeichnet sich hier durch ein linear verlaufendes Minimum, d. h. durch eine deutliche

Abb. 35 Qualitative Darstellung der Änderung der magn. Totalintensität, berechnet aus dem Grautonbild (Abb. 34). Die größten Änderungen (ca 120 Gamma/km) sind in weiß dargestellt.

Die Kontaktbereiche der Doleritgänge, die erhöhte Wahrscheinlichkeiten auf Kluftwasservorkommen aufweisen, lassen sich als ca 120 -gerichtete helle Linien interpretieren.



"Talform" aus (Abb. 33/34). Der hydrogeologisch wirksame Kontaktbereich des Ganges zum umgebenden Granit liegt in diesem Fall im Bereich der längserstreckten Totalintensitätsänderung.

Diese Aussage läßt sich auf keinen Fall verallgemeinern, doch kann sie in diesem Fall für eine qualitative Darstellung der Kontaktbereiche möglicher Doleritgänge dienen. Sehr deutliche, nahe beisammenliegende Minima und Maxima sprechen im Gegenteil für eine einzige lithologische Einheit. Entscheidend bei der Interpretation ist die Längserstreckung in der Änderung der magnetischen Meßwerte.

Der Programmteil "Slope Analyses", ein Teil des rasterbezogenen Topographieauswerteprogrammes GRD TOPO bietet mehrere Möglichkeiten Hangneigungen vektoriiell oder vom Betrag her zu berechnen. Die Steigung wird jeweils aus dem Verhältnis der Zentralzelle zu einer oder mehrerer der 4 oder 8 umgebenden Zellen errechnet. Im vorliegenden Fall wurde der Betrag der größten Steigung aus den 8 Richtungen für die Berechnung gewählt (Abb.35).

Interessant sind, wie oben beschrieben, über größere Strecken linear ausgedehnte, stärkere Änderungen der Totalintensität. Diese Totalintensitätsänderung sollte nur zusammen mit der Totalintensitätskarte, besser noch zusammen mit der Geländeinformation aus Luft- oder Satellitenbild ausgewertet werden.

Die Änderung in den aeromagnetischen Daten wurde deshalb auch zur Überlagerung mit den Spot-Simulationsdaten, nicht zur getrennten Auswertung berechnet.

6.3.3 Bewertung, Kritik

Das ursprünglich für Großrechner (Prime, IBM etc) ausgelegte ESRI-GIS Programm zeigte nach seiner Installation auf dem DEC-PDP-11 Rechner einige, seine Anwendung einschränkende Limitierungen:

1. Das Maximum an digitalisierbaren Geometrien (Linien oder Isolinen) lag bei 300.
2. Das Maximum an digitalisierbaren Punkten auf diesen Linien lag bei 5000.
3. Der maximale Umfang der beschreibenden Werte betrug 60 Stufen.

Dieser letzte Punkt schränkte die Anwendbarkeit am wenigsten ein. Bei einem konstant mit 10 gamma digitalisierten Isolinienabstand kann ein Totalintensitätsunterschied von 600 gamma erfasst werden. Liegt dieser Unterschied über 600 gamma, könnte wohl auf die kleineren Schwankungen (< 20 gamma) verzichtet und nur jede 2. Isolinie digitalisiert werden.

Wesentliche Einschränkungen aber folgten aus den Punkten 1 und 2. Bei der praktischen Anwendung wurden beide Grenzen mehrfach überschritten, so daß einzelne Isolinien, die parallel zwischen 2 anderen lagen, nachträglich wieder gelöscht werden mußten. Ein sogenanntes "Weed"-Programm ermöglicht die nachträgliche Filterung der digitalisierten Punkte, die so unter 5 000 gehalten werden können.

Die Auswirkungen dieser beiden Einschränkungen haben sich weiter verschärft durch den nicht ausgereiften Interpolationsalgorithmus. Bei größeren räumlichen Isolinienabständen traten nach der Interpolation zunächst Stufen auf. Diese nicht oder ungenügend interpolierten Flächen sind auf den zu großen Abstand zum nächsten digitalisierten Punkt zurückzuführen. Bei einem Raster von 300 x 300 Punkten und dem Maximum an erfassbaren Punkten von 5 000 liegt der durchschnittliche Abstand eines digitalisierten Punktes zum nächsten schon bei knapp 3 Pixeln. Häufig liegen die Linien aber sehr viel weiter auseinander, so daß über größere Flächen gar keine Interpolation erfolgen konnte.

Weitere Flächen mit einheitlichen Werten entstanden innerhalb geschlossener maximaler oder minimaler Isolinien. Da die Interpolation nicht vektoriell erfolgt, wurde ohne zusätzliche Manipulation die Interpolation an "Gipfeln" und "Tälern" mit horizontalen Flächen abgeschlossen.

Einige der beschriebenen Mängel konnten in jüngster Zeit verbessert werden. Trotzdem empfiehlt sich in jedem Fall die Weiterverarbeitung der GIS-Ausgangsdaten mit der Bildverarbeitungssoftware.

Das Programm selbst sollte um eine vektorielle Interpolationsmöglichkeit bei der Überführung von digitalisierten Linien ins geschlossene Rasterformat erweitert werden.

6.3.4 Empfehlungen für die Isoliniendigitalisierung

Die Erfahrungen bei der Digitalisierung von Isolinien können in den folgenden Empfehlungen zusammengefasst werden:

- * Die Anzahl der Zeilen und Spalten sollte möglichst gering gehalten werden, weil erstens das Interpolationsergebnis bei größeren Pixeln besser ist und zweitens die Rechenzeiten verkürzt werden. Die Vergrößerung der Rasterfelder geht allerdings auf Kosten der geometrischen Genauigkeit und sollte deshalb den Daten entsprechend abgewogen sein.
- * Möglichst viele Isolinien sollten digitalisiert werden. Bei sehr großen räumlichen Isolinienabständen (>10 Pixel) sollte eine Zwischenlinie eingefügt werden. Dies verbessert das Interpolationsergebnis und verkürzt die Rechenzeit.
- * Bei mehreren sehr eng, parallel liegenden Isolinien (<2 Pixel) kann auf die Digitalisierung von Abschnitten einzelner Linien verzichtet werden.
- * Bei geschlossenen minimalen oder maximalen Isolinien sollte ein zusätzlicher höherer oder tieferer Wert definiert werden, um die richtige Interpolation auch in diesem Bereich zu ermöglichen.
- * Die Einführung zusätzlicher, wie die Streichung überflüssiger Geometrien sollte vorsichtig gehandhabt werden. Sie kann sowohl zu einer realeren Darstellung nötig sein, diese aber auch verfälschen.

6.4 Darstellung integrierter Daten durch die Bildverarbeitung

6.4.1 Übersicht

Die Verknüpfung verschiedener Datensätze soll, wie beschrieben, nicht im Datenmanipulationssegment der GIS-Software erfolgen, sondern mit Hilfe der Bildverarbeitungssoftware. Ebenso soll das Endprodukt nicht in Form einer Karte, sondern als synthetisches, photographisches Produkt dargestellt werden, das alle Vorteile - sowohl die der Farbkodierung, als auch die der höheren Informationsdichte - gegenüber vom Computer ausgedruckten Karten nutzt. Mit den Bildverarbeitungsprogrammen SWING (Fernandez et al, 1985) können vor der Überlagerung sowohl die Satellitendaten anwendungsspezifisch vorverarbeitet werden, als auch die mit der GIS-Software digitalisierten Daten korrigiert und ihre Darstellungsform verbessert werden. Diese Aufbereitung der digitalisierten, in diesem Fall aeromagnetischen Daten durch die Bildverarbeitungssoftware kann auch die beschriebenen Mängel der GIS-Software, zumindest in der Darstellung, unterdrücken:

1. Die Mängel bei der Interpolation zwischen den Isolinen, die Stufenbildung, kann durch eine Lowpass-Filterung (Kap. III-6.4.5) korrigiert werden.
2. Die relativ geringe Pixelzahl (unter 300 x 300) bei den digitalisierten Daten kann vor der exakten geometrischen Korrektur der Satellitenbilder angepasst werden, so daß im Endprodukt keine groben Raster die Interpretation beeinflussen.
3. Durch die Verfünfachung der Zeilen und Spalten der digitalisierten, aeromagnetischen Daten entstehen bei der anschließenden Lowpass-Filterung keine Änderungen im Grauwert des Zentralpixels. Die Lage und der absolute Wert bleiben konstant, lediglich die Übergänge von einem ursprünglich groben Pixel zum angrenzenden werden mit 4 dazwischenliegenden interpolierten Grauwerten geglättet. Diese an sich kosmetische Operation verbessert die Interpretierbarkeit des Datensatzes in der Überlagerung erheblich.

Das in der Bilddarstellung hauptsächlich verwendete Rot-Grün-Blau System (RGB) bietet sich nur zur Überlagerung von Echt- oder Standardfalschfarbendaten an.

Daten unterschiedlicher Sensoren lassen sich in einer RGB-Überlagerten Darstellung nur sehr beschränkt differenziert interpretieren, weil die gegenseitige Beeinflussung der einzelnen Farbkomponenten zu groß ist.

Der der Farbe zugeordnete Datensatz in einem Intensität-Farbe-Sättigung System (IHS) demgegenüber läßt sich leicht von einem anderen, rein schwarz-weißen Datensatz (Intensität) unterscheiden.

Auch ein synthetisch berechneter Stereoeffekt (SST) eignet sich sehr gut zur differenzierten Interpretation eines einzelnen Datensatzes innerhalb eines Überlagerten Bildproduktes. Der Stereoeffekt kann je nach Anwendungsziel, sowohl auf ein RGB-, als auch auf ein IHS-Bild angewandt, Vorteile bringen, da eine weitere Datenebene unabhängig berücksichtigt werden kann.

Da die Überlagerungen als photographische Produkte ausgegeben und interpretiert werden, muß den Eigenschaften des Photopapiers Rechnung getragen werden. Photopapier läßt eine sehr viel begrenztere Grauwertdifferenzierung zu, als sie vom Aufnahmesystem und der Bildverarbeitung her möglich wäre.

Mit einer weiteren Filterung, dem Dogding (Henkel, in praep; Kap. III-6.4.5) wird der Gesamtkontrastumfang eingeschränkt, ohne die Grautonsprünge zu verändern. Mit dieser Filterung kann die best mögliche Differenzierung am Bildschirm mit nur geringster Einschränkung auch auf der eigentlichen Interpretationsgrundlage, dem photographischen Produkt, erreicht werden.

6.4.2 Geometrische Korrektur

Alle Überlagerungen verschiedener Datensätze verlangen zunächst eine geometrische Anpassung. Bei der Verknüpfung von Datensätzen verschiedener Sensorsysteme werden am Bildschirm Zeilen- und Spaltennummer sogenannter "Passpunkte", d.h. einer bestimmten Referenzlokalität gemessen. Je nach Bildgröße werden möglichst viele, mindestens aber 5, über das Bild verstreut liegende, solcher Punkte gleicher Lokalität aus Quell- und Zielbild bestimmt.

Mit Hilfe eines Computer-Programmes ("Fitting", vgl. Siegal, Gillespie, 1982; Henkel, 1982) werden daraus die Verzerrungsparameter für das Quellbild errechnet. Das Programm gibt zusätzlich den relativen Fehler der Verzerrung in Pixel und in % an. Die Messung muß so lange wiederholt werden, bis die schlechteste Korrelation eines Passpunktes < 1 Pixel ist.

Erst dann kann das Quellbild mit dem Registrierungsprogramm der SWING-Software (Fernandez, et al, 1985) auf die Geometrie des Zielbildes transformiert werden.

Dieses System der geometrischen Anpassung mit Hilfe gemessener Passpunkte ist unabhängig vom Projektionstyp der Daten.

Zur Überlagerung von Scannerdaten mit Karten genügt in der Regel eine lineare Transformation in Zeilen- und Spaltenrichtung. Bei der Überlagerung zentralprojizierter Luftbildinterpretationen ist eine quadratische Anpassung die bessere. Der Transformationsalgorithmus wird am sichersten nach den Korrelationsergebnissen des "Fit-Programmes" gewählt.

Anwendung

Bei der Überlagerung digitalisierter, thematischer Karten kann das beschriebene Verfahren etwas vereinfacht werden. Bei der Digitalisierung können der topographischen Grundlage der Karten Passpunkte entnommen und gleich mitdigitalisiert werden. Somit müssen die Passpunkte nur noch im Zielbild gemessen werden.

Die Überlagerung kann geometrisch exakter durchgeführt werden, wenn beide, Quell- und Zieldatensatz, die gleiche Größenordnung an Zeilen und Spalten aufweisen. Bei der Wahl der geometrischen Auflösung von zu digitalisierenden Karten sollte deshalb die Auflösung des Fernerkundungsdatensatzes berücksichtigt werden.

Aus systemtechnischen Gründen (Kap. III-6.3.3) konnte mit der ESRI-Software die zur Überlagerung mit den Spot-Simulationsdaten günstigste Zeilenanzahl von 1200 nicht erreicht werden. Vor der geometrischen Korrektur der digitalisierten Daten wurde die gerastete Zeilenzahl, auch aufgrund der nötigen Lowpass-Filterung, verüffacht.

Überlagerungen auf eine Satellitenbildbasis von mehr als 1200 Zeilen und Spalten sollten ausschnittsweise durchgeführt werden, da zu große Unterschiede in der Auflösung der Datensätze geometrische Ungenauigkeiten bei der Überlagerung zufolge haben.

6.4.3 IHS (Intensity-Hue-Saturation) - Darstellung

"Farbe" ist im IHS-Farbraum anhand dreier Parameter definiert:

Die Farbfrequenz (H) beschreibt die Lage des Schwerpunktes der Wellenlängen. Sie bestimmt den absoluten Farbwert im Bild.

Die Sättigung (S) bestimmt die spektrale Ausweitung (Breite) der reflektierten Wellenlängen. Eine Farbe gilt dann als vollkommen gesättigt, wenn ausschließlich Licht der ihr entsprechenden Wellenlänge reflektiert wird. Mischsignale aus mehreren Wellenlängen, d.h. Pastelltöne, sind ungesättigt.

Die Intensität (I) entspricht direkt der Gesamtreflexion ohne Berücksichtigung einzelner Wellenlängenbereiche.

Alle 3 Größen lassen sich unabhängig voneinander verändern, weiterverarbeiten und vor allem einzeln interpretieren.

Mathematische Ableitungen des IHS-Modelles sind u.a. Siegal, Gillespie (1980) zu entnehmen. Die verwendeten SWING-Programme benutzen allerdings einen etwas vereinfachten, rechentechnisch schnelleren Algorithmus, der als Intensität nicht die Totalreflexion, sondern die stärkste Reflexion der Einzelkanäle heranzieht (Haydn et al, 1982,1+2)

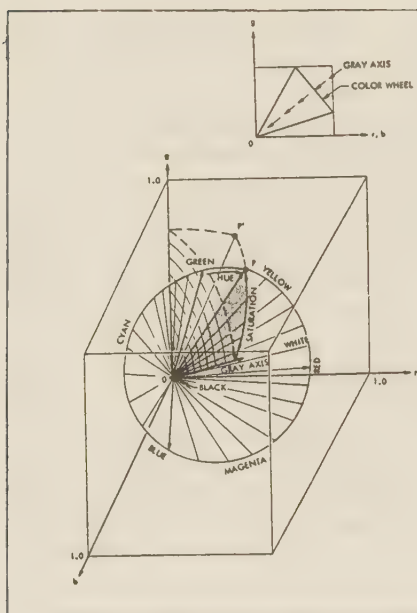


Abb.36

RGB-Würfel mit eingezeichnetem IHS-Kegel (aus Siegal, Gillespie 1980)

Die Intensitäts-(Grau)-Achse im Ursprung schwarz und in der Raumdiagonalen zunehmend heller.

Senkrecht dazu die Farbkreise, je nach Intensität unterschiedlich weit vom Ursprung entfernt.

Die Sättigung wird durch den Radius der Farbkreise bestimmt.

Anwendung des IHS-Modelles zur Datenüberlagerung

Datenüberlagerungen sollen die Möglichkeit bieten verschiedene Datensätze in ihrer Synopsis interpretierbar zu machen ohne die Einzelinformation jedes Datensatzes an Mischsignale zu verlieren. Das IHS-Modell bietet diese Möglichkeiten.

Um optimal interpretierbar zu sein, müssen bei der Verarbeitung die speziellen Differenzierungseigenschaften des menschlichen Auges berücksichtigt werden. Der Schärfeeindruck eines Farbbildes liegt bei dieser 3-Komponentendarstellung deutlich in der Intensität (Haydn et al, 1982,1). Geometrisch kleinste Formen werden in der Intensitätsdifferenzierung weit besser unterschieden, als in Farb- oder Sättigungsunterschieden.

Zur Unterscheidung größerer, von der Reflexion her jedoch sehr ähnlicher Körper eignet sich bei ausreichender Sättigung die Unterscheidung nach der Farbe besser. Während das Auge im SW-Bereich maximal nur 30 - 40 Graustufen unterscheidet, vermag es wesentlich mehr Farbtöne zu differenzieren.

Am schwierigsten zu unterscheiden ist der Sättigungsgrad der Farben. Eine Sättigungsdifferenzierung ist zwar innerhalb einer Farbe noch möglich, doch die Zuordnung von Sättigungsgraden bei verschiedenen Farben ist kaum möglich. Zur Überlagerung verschiedener Datensätze sollte das IHS-Modell deshalb wie folgt verwendet werden:

als Intensität der geometrisch höchst auflösende Datensatz

als Farbe der radiometrisch höchst auflösende Datensatz,
der geometrisch zweithöchst auflösende Datensatz

als Sättigung diejenigen Datensätze für deren Interpretation eine geometrisch wie radiometrisch qualitative Auswertung ausreicht.

Bisher wurde das IHS-System nur zur Überlagerung von Fernerkundungsdaten verschiedener Sensoren verwendet (Haydn et al, 1982, 1+2; Kaufmann, 1986).

Es läßt sich aber genauso effektiv für die Überlagerung digitalisierter thematischer Karten einsetzen (Bild 4 u. 5). Dabei gelten ebenso die obengenannten Empfehlungen für die optimale Darstellung integrierter Daten.

Entsprechend wurden in der Überlagerung die Spot-Simulationsdaten als geometrisch höchstauflösend (20 m) der Intensität zugeordnet und die digitalisierten aeromagnetischen Werte (50 m) der Farbe.

Die Sättigung wurde nur bei der additiven Darstellung des Vegetationsunterschiedes aus Landsat-MSS-Daten (Bild 1) als Maskierung bzw. Verstärkung benutzt. Die Vegetationsgebiete im Januar wurden dort stark gesättigt, so daß eine starke Reflexion im April in vorher vegetationslosen Gebieten unterdrückt wird. Eine Reflexionszunahme von Januar bis April kann nicht auf stärkere Vegetation zurückgeführt werden, sondern ist durch den höheren Sonnenstand bedingt.

Bei den Überlagerungen von aeromagnetischen mit Spot-Simulationsdaten (Bild 4 u. 5) war ein solcher maskierender Effekt nicht gewünscht; die Farbe (Aeromagnetik) sollte im gesamten Bild gleich differenzierbar sein.

Die Sättigung wurde bei allen Überlagerungen deshalb konstant gehalten.

6.4.4 Synthetischer Stereoeffekt (SST)

Bilddarstellungen mit synthetischem Stereoeffekt bieten die Möglichkeit, sowohl neben den RGB-, als auch neben den IHS-Komponenten eine vierte Datenebene zu überlagern.

Mit Hilfe einer Parallaxenformel (Haydn et al, 1982, 1 S.41 ff) wird genau invers zur topographischen Auswertung von stereoskopischen Luftbildern die Parallaxe künstlich aus den Werten eines weiteren Datensatzes errechnet. Das Ergebnis ist ein Stereobildpaar, in dem der Höheneffekt die Intensität des steuernden Datensatzes wiedergibt.

Die naheliegendste Anwendung dieses Verfahrens ist die Parallaxenberechnung für Satellitenbilder, basierend auf digitalisierten topographischen Daten, d.h. die Zuordnung tatsächlicher Höhen mit Hilfe eines digitalen Höhenmodells.

Synthetische Stereobilddarstellungen wurden 1982 von Haydn et al. auch zur Überlagerung von Landsat-MSS und HCMM-Thermaldaten verwendet.

Anwendung

Die Interpretation von Stereobildern erfordert den Einsatz von Spiegelstereoskopen; eine Verifizierung der Daten im Gelände ist daher nur beschränkt möglich. Demgegenüber gehören Stereoskope inzwischen zur Grundausstattung auch kleiner Institute und Consultants in Westafrika.

Stereoskopische Darstellungen bieten sich an:

- wenn mehr als 3 Datensätze in einem Bildprodukt dargestellt werden sollen und Ratioauswertungen ungenügend sind.
- wenn 3 Datensätze eine bessere Einzeldifferenzierbarkeit erlauben sollen, als dies durch Sättigungsunterscheidungen möglich ist.
- wenn ein Natur- oder Standardfalschfarbenbild der gewohnten und sicher interpretierbaren Darstellungsform wegen erhalten bleiben, zusätzliche aber mit einer weiteren Datenebene verknüpft werden soll.

Für den konkreten Einsatz integrierter Daten in Westafrika trifft vor allem der 3. Punkt zu. Falschfarbendarstellungen sind im allgemeinen bekannt, ebenso die stereoskopische Darstellungsform aus Luftbildern. Soweit zusätzlich die thematische Einsatzmöglichkeit aeromagnetischer Daten in der Grundwasserprospektion

bekannt ist, kann das stereoskopische Falschfarbenbild mit den aus der Aeromagnetik berechneten Parallaxen ohne größere Einarbeitungszeit direkt interpretiert werden.

Von größtem Vorteil bei der Anwendung ist dabei, daß die für die hydrogeologische Fragestellung sehr wichtige Vegetationsinformation, wie gewohnt in der roten Farbe im Satellitenbild erhalten bleibt (Bild 6 u.7).

"Täler" in Bild 6/7, aeromagnetische Minima, dürfen natürlich nicht als hydrogeologisch interessantere Bereiche interpretiert werden, sondern müssen tatsächlich als magnetische Meßwerte betrachtet werden bei denen kluftwasserhöfliche, lithologische wie tektonische Unstetigkeitsstellen eher in den "Hängen" liegen (Bosum, 1981 und Kap. II-4).

Aus diesem Grund wurden zusätzlich die Änderungen der aeromagnetischen Daten stereoskopisch dargestellt (Bild 8/9).

Diese "Täler", großen, längserstreckten, magnetischen Änderungen zugeordnet, korrespondieren in hohem Maße mit den tatsächlichen oberflächlichen Wasserabflußwegen und sind eher als grundwasserhöflich zu bezeichnen.

Die stereoskopische Überlagerung aeromagnetischer Daten und den magnetischen Totalintensitätsunterschieden auf Falschfarbendarstellungen eignet sich somit zur hydrogeologischen Anwendung in Westafrika trotz des Geräteaufwandes besser als die IHS-Darstellungsform, weil:

1. die Interpretation auf bekannten Darstellungsformen aufbauen kann und
2. die spektrale Vegetationsdifferenzierung (im Roten) auch in der Überlagerung erhalten bleiben kann.

6.4.5 Dodging

Die beschriebenen Daten sollen in verschiedenen Verarbeitungsformen praktisch eingesetzt werden. Die Auswertung von Fernerkundungsdaten erfolgt auf photographischen Abzügen dieser digital erzeugten Bilder. Photopapier, selbst weichstes, erfasst bei weitem nicht den Grauton- (Kontrast-) umfang von 8 bit (256 Stufen), der bei fast allen Bildverarbeitungsverfahren als Maximum verwendet wird. Auf 256 Stufen gestreckte Daten lassen sich häufig in ihren Extremwerten, nahe dem Schwarzen oder Weißen nicht mehr differenzieren.

Von den rein photographischen Maskierungsverfahren abgeleitet entwickelte Henkel (in praep) ein Filterverfahren, das den eingeschränkten Eigenschaften des Photopapiers gegenüber den Digitaldaten Rechnung trägt, ohne auf maximale Streckungen verzichten zu müssen. Mit diesem, "Dodging" (engl. irreführen, täuschen) genannten Programm werden größere, sehr dunkle Bildbereiche aufgehellt, sehr helle abgedunkelt. Die Grautonsprünge bleiben jedoch auch von ihrem Betrag her erhalten. Dies geschieht durch eine großräumige (min. 25 x 25 Pixel) Lowpass-Filterung, deren Ergebnis vom Ausgangsbild abgezogen wird.

gedodgetes Bild = Ausgangsbild - n % Lowpassbild

Sowohl der Grad von Aufhellung oder Verdunklung (n) als auch die Filtergröße müssen den Daten angepasst werden (Henkel in praep).

Anwendung

Das bisher unbekannte, digitale Dodging sollte für jede Art von Strukturauswertung auf digitaler Satellitenbildbasis angewandt werden.

Die zu interpretierenden Lineamente liegen in ihrer Breite in jedem Fall weit unter der Filtergröße und bleiben daher in ihrem Kontrast unverändert erhalten. In den Grauwertextrembereichen dagegen -in N-Burkina Faso sind dies die fast schwarz erscheinenden Gabbros und die sehr hellen Dünensande- zeigen gefiltert abgespielte Bilder noch Differenzierungen und Strukturen auch innerhalb dieser ungefiltert homogen erscheinenden Flächen.

Die Grautonverschiebung über größere Flächen, die spektrale Reflexionsdifferenzierungen lithologisch verschiedener Oberflächen einschränken oder verfälschen würde, fällt bei der vorliegenden Anwendung nicht ins Gewicht.

Das Dodging-Filterverfahren sollte nicht angewandt werden,

- wenn die Daten weiter digital verarbeitet werden sollen,
- wenn absolute Reflexionsmessungen an den Daten durchgeführt werden sollen,
- wenn Interpretationen absoluter Grauwerte auf dem Papierabzug ausgeführt werden.

Für die Anwendung in der Strukturinterpretation auf S/W- und Farb-Papierabzügen bringt diese Filterung eine entscheidende Verbesserung der Auswerteunterlagen mit sich.

7. Zusammenfassung und Diskussion

Zielsetzung der anwendungsoptimierten Bildverarbeitung ist es, eine verbesserte Auswertgrundlage für den Interpreten zu schaffen, nicht eine interpretierte Karte zu liefern.

Tabelle 10 faßt die beschriebenen Verfahren, die zur Verbesserung der Auswertgrundlage für die Grundwasserprospektion im Sahel Burkinas erarbeitet wurden zusammen.

Es muß dabei klar sein, daß keine Verarbeitung mehr als die ursprünglich registrierte Information im Bild enthalten kann. Lediglich kann die nur schwer interpretierbare Information verdeutlicht dargestellt werden.

Dies bedingt eine Filterung oder Unterdrückung anderer, unerwünschter oder unrelevanter Bildinhalte. So ist beispielsweise in der Darstellung der chlorophyllarmen Dornbusch- und Savannengrasvegetation (Bild 3) die stärker chlorophyllhaltige Trockentalvegetation nur noch unvollständig wiedergegeben.

Tab.10: Zusammenfassung der Möglichkeiten zur Optimierung der Bildauswertebasis für die Grundwasserprospektion im Sahel

Konzeption		Vorteile
Verwendung von neuen Daten	Spot Simulationsdaten Thematic Mapper Daten NOMS Daten (vom Feb. 84) Spot Satellitendaten (ab Feb. 86)	*Höhere geometrische Auflösung, *engere und besser gewählte Spektralkanäle, *Möglichkeit häufiger und kurzfristiger Aufnahmewiederholung, *Identifizierung kleinerer, spektral nur wenig unterschiedlicher Oberflächen
Bildverarbeitung für die Grundwasserprospektion im Sahel von Burkina Faso	Highpassfilterung Vegetationsverarbeitung	*Kontrastverstärkung, *bessere Interpretierbarkeit von Grautonunterschieden der definierten räumlichen Filtergröße *verbesserte Interpretierbarkeit chlorophyllhaltiger Trockentalvegetation *zusätzliche Interpretationsmöglichkeit der chlorophyllarmen Dornbusch- und Steppengrasvegetation
Anwendungs-optimierte Verarbeitung und Darstellung	Überlagerung mit digitalisierten aeromagnetischen Karten und mit berechneten Totalintensitätsunterschieden IHS-Bilddarstellung SST-Bilddarstellung Dodging	*zusätzliche Information über Sockelstrukturen in synoptischer Form *verbesserte Interpretationsmöglichkeit von Lineamenten in sedimentbedeckten Zonen *verbesserte Interpretierbarkeit der aeromagnetischen Daten durch die Oberflächeninformation *individuelle und synoptische Betrachtungsweise mehrerer Datensätze *individuelle und synoptische Betrachtungsweise mehrerer Datensätze *vertraute und sicher interpretierbare Darstellungsform, besonders für die Vegetation *Interpretation geringer Grautonunterschiede auch in hellen und dunklen Bildbereichen

Das thematische Anwendungsziel muß für die Selektion von Kanälen, für die Bildverarbeitung und für die damit immer verbundene Datenreduktion exakt definiert sein.

Diese Datenreduktion in der Bildverarbeitung ist zur Darstellung aller digitalen Fernerkundungsdaten notwendig.

Schon bisher wurden meist nur 3 von 4 Landsat MSS-Kanälen zu einem Bild verarbeitet. Bei den 7 Kanälen des Thematic Mapper ist diese Selektion spektraler Aufnahmebereiche für die Verarbeitung noch weit dringender.

Die Anwendung eines geographischen Informationssystems in Verbindung mit der Bildverarbeitung wurde im Rahmen des beschriebenen BMFT-Vorhabens erstmals getestet. Die verwendete Software (ESRI) ist wie die meisten geographischen Informationssysteme primär auf die Digitalisierung und Verarbeitung von Polygonen ausgelegt. Die Verarbeitungsmöglichkeiten im Rasterformat, wie sie bei Isolinkarten nötig ist, sind im Gegensatz zu denen im Vektor- bzw. Polygonformat sehr begrenzt und aufwendig.

Des weiteren werden in geographischen Informationssystemen üblicherweise "interpretierte" Datensätze wie vegetationskundliche, pedologische oder auch geologische Karten verarbeitet und seltener flächendeckende Meßdaten.

Die Vermischung, bzw. digitale Überlagerung dieser unterschiedlichen Arten von Daten vermittelt dem Interpreten des Überlagerungsproduktes einen falschen Eindruck definitiver Information. Die digitale Weiterverarbeitung interpretierter Karten sollte in jedem Fall sehr kritisch betrachtet werden; in der vorliegenden Arbeit wurde ganz darauf verzichtet. Dieses Problem ist in der abschließenden Diskussion (S. 153) ausführlicher beschrieben.

Bei der Digitalisierung und Verarbeitung von Meßkarten wie der magnetischen Totalintensität sollte die Auflösung der digitalisierten Daten der Messung entsprechen.

Ungenauigkeiten entstehen nicht nur bei einer schlechter auflösenden Digitalisierung, sondern auch bei einer Zahl von digitalisierten Rasterzellen, die weit über die Zahl der Meßpunkte hinausgeht.

Für den speziellen Einsatz zur Digitalisierung und Rasterung von Isolinkarten ist die verwendete ESRI-Software in weiten Bereichen unzureichend und nur durch aufwendige Nachkorrektur mit der Bildverarbeitungssoftware (SWING) des geologischen Institutes anwendbar.

Soweit erhältlich, sollten Meßdaten zur Überlagerung direkt vom Magnetband in die Bildverarbeitungssoftware eingegeben werden. Allerdings hat die SWING-Software bisher noch kein Programm für eine richtungslose Steigungsberechnung, wie es zur Bestimmung der Totalintensitätsunterschiede eingesetzt wurde.

Die Verknüpfung und Auswertung verschiedener Meßdaten in einem Bild bringt, insbesondere bei digital aufgenommenen und abgespeicherten Daten wie der Reflexion, der magnetischen Totalintensität, des geoelektrischen Widerstandes oder (Th, U, K-) spektrometrischer Daten, Vorteile durch die geometrisch exakte Anpassung und die besondere synoptische Betrachtungsweise. Die Verknüpfung und Bildoptimierung muß allerdings, eventuell basierend auf neuen Standards, für jedes Arbeitsgebiet neu erarbeitet werden.

8. Bildprodukte

Basierend auf der beschriebenen Konzeption und nach der Gelände-
verifizierung einer ersten Serie verarbeiteter Bilder, wurden
einige erfolgversprechende Verarbeitungen wiederholt und weiter-
verbessert.

Die Verarbeitung dieser speziellen Bilddarstellungen ist im
Folgenden beschrieben. Die stereoskopischen Darstellungen (Bild
6/7 u. 8/9), die mit Hilfe eines Spiegelstereoskopes ausgewertet
werden müssen, befinden sich in der Tasche auf der letzten Seite.

8.1. Vegetationsdarstellung aus der Januaraufnahme von Landsat Band 6 (Bild 3)

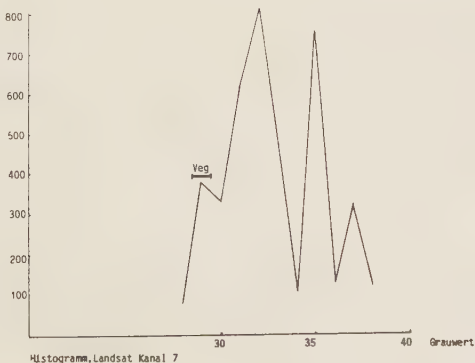
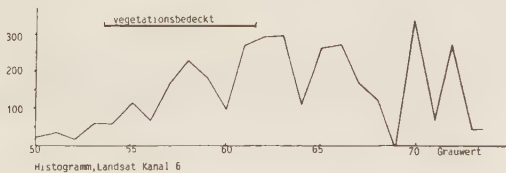
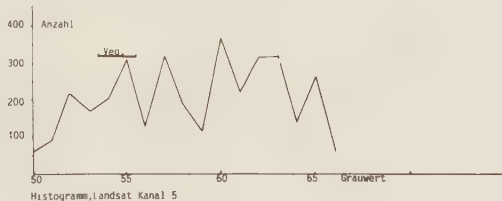
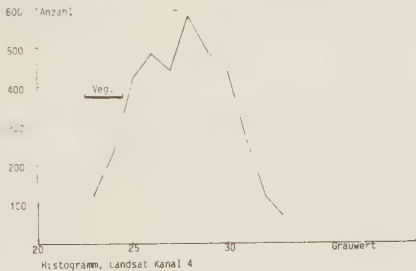
Die Gelände-
verifizierung der ersten Verarbeitungsserie von Fern-
erkundungsdaten und die Beobachtungen während der Bildverarbei-
tung (Kap. III-3.3) zeigten, daß die üblichen, in der Literatur
angegebenen Methoden zur Darstellung der Vegetation (Ratio 5/7
oder 5/6) in diesem Gebiet nur für die dichte Baumvegetation in
den Trockentälern anwendbar sind, sonst aber nur unbefriedigende
Ergebnisse liefern.

Anhand der Gelände-
kenntnis wurde deshalb ein Testfeld mit be-
kannter Vegetationsdichte gewählt, - der Dünenbereich in und um
die Ranch von Markoy (14°39'N, 0°) - um spektrale Unterschiede in
den Landsat-Kanälen der Vegetation zuordnen zu können.

Die Ranch von Markoy mit der scharfen Grenze ihrer Umzäunung war
als Referenzfläche zur Unterscheidung von schwach vegetationsbe-
decktem zu vegetationslosem Dünen-
sand besonders geeignet. Für
dieses Testfeld wurden die Histogramme berechnet (Abb. 37).

Dann wurden in jedem Kanal einzeln die Grauwerte innerhalb der
vegetationsbedeckten Ranch gemessen und den Histogrammen zuge-
ordnet. Die dichte Baumvegetation in den Trockentälern, die be-
reits aus Standardfalschfarbenverarbeitungen interpretierbar war,
blieb dabei unberücksichtigt. Dargestellt werden sollte dagegen
besonders die Gras- und Buschvegetation mittlerer Dichte.

Abb. 37 : Histogramme der Landsat-Daten, berechnet für das Referenzfeld Markoy-Ranch, zur Unterscheidung des spektralen Verhaltens schwach vegetationsbedeckter und vegetationsloser Oberflächen. (Landsat MSS vom 17. Jan. 1976)



Die beste Differenzierung der Vegetation im Histogramm zeigt der Kanal 6 (*). Darin lassen sich nicht nur vegetationslose von vegetationsbedeckten Gebieten unterscheiden, sondern auch innerhalb der Ranch sind noch Grautonunterschiede zu erkennen. Wie beschrieben (Kap. III-3.3) wirkt die Vegetation maskierend auf den stark reflektierenden Dünensand.

Drei Gruppen unterschiedlich starker Maskierung wurden in der Darstellung unterschieden. Diese 3 speziell gemessenen Grautonabschnitte, die sehr wahrscheinlich unterschiedlicher Vegetationsdichte entsprechen, sind als rot, mit größter Maskierung und vermutlich dichtester Vegetation, über grün bis blau, mit schwacher Maskierung und geringer Vegetationsdichte, dargestellt.

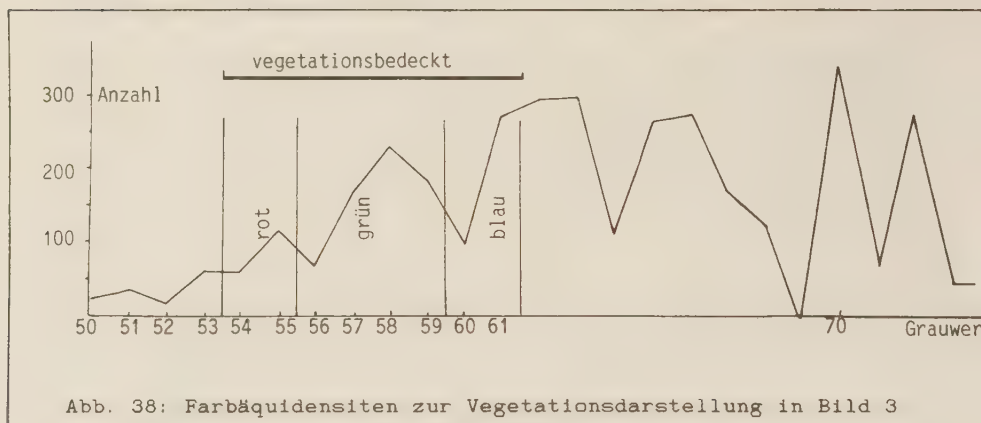


Abb. 38: Farbäquidensiten zur Vegetationsdarstellung in Bild 3

(*) Die Landsat 1-3 Daten des Eros-Datencenters, von dem diese Szene bezogen wurde, sind mit 7 bit kodiert. Lediglich der Kanal 7 ist nur mit 6 bit kodiert. Die Dynamik dieses Kanals ist demnach nur halb so groß, wie die der übrigen Kanäle (vgl. Histogramme in Abb. 37). Aus diesem Grund ist die Differenzierungsmöglichkeit im Kanal 6 in diesem Fall größer, selbst wenn die spektralen Unterschiede im Kanal 7 stärker sein sollten.

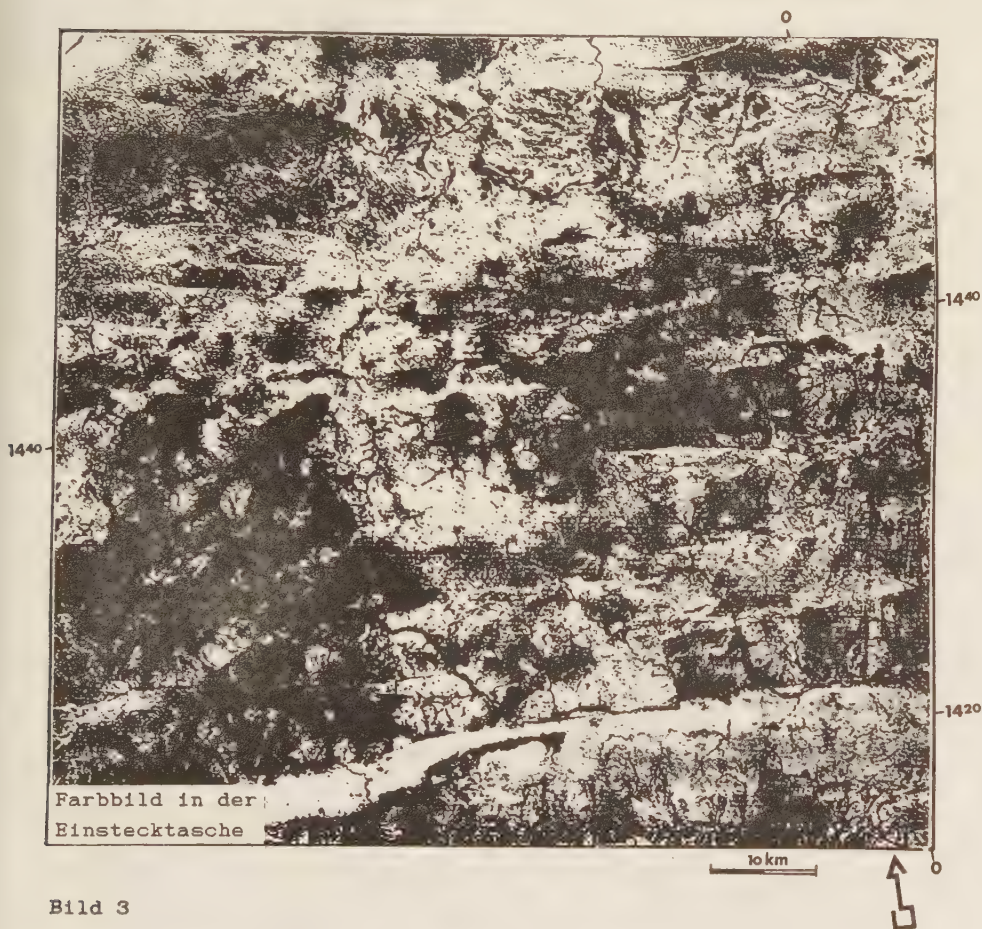


Bild 3

Bildverarbeitung : IHS-Darstellung "Vegetation"

I : Der Kanal 6 ist von 30-78 auf 0-255 gestreckt. Die Intensität erscheint schwarz-weiß.

H : Die Grauwerte des Kanals 6 zwischen 54 und 61 sind farbkodiert : 54-55 als rot, 56-59 als grün, 60-61 als blau, d.h. diese Grauwerte sind als Farbäquidensiten innerhalb des schwarz-weiß Bildes dargestellt.

S : Die Farbsättigung ist für alle Grauwerte <54 und >61 gleich 0. Für alle Grauwerte dazwischen ist sie 255, also maximal.

Das Bild ist "deskewed", d.h. es hat gleichen Zeilen- und Spaltenmaßstab, entspricht also einer parallel projizierten Karte.

8.2 Kombinierte Bildprodukte aus Spot-Simulationsdaten und aeromagnetischen Daten

Die wichtigsten Vorteile von Spot, bzw. Spot-Simulationsdaten gegenüber den bisher verwendeten Landsat MSS-Daten sind vor allem die höhere Auflösung (20 x 20 m u. 10 x 10 m) und die enger und besser gewählten Spektralkanäle. Diese Vorteile sind bei der Auswahl und Verarbeitung dieser Bildprodukte berücksichtigt. Nach allen vorausgegangenen Untersuchungen schienen die folgenden Verarbeitungen die Günstigsten:

8.2.1 IHS-Darstellungen

I. IHS-Bild aus dem panchromatischen Spot-Kanal und der Aeromagnetik (Bild 4)

Intensität (I):

Der panchromatische Spot-Kanal ist von 100-230 auf 20-230 vorgestreckt, dann erst gefiltert (9 x 9 Highpass nach speziellen Untersuchungen, Kap. III-4.3). Um auch auf dem Papierabzug die optimale Grauwertdifferenzierung, sowohl in den hellen Dünenbereichen, als auch innerhalb der dunklen Trockentäler und der stärker vegetationsbedeckten Markoy-Ranch zu erhalten, ist das Bild nochmals gefiltert (Dodging, 50%, 35 x 35 Filtergröße; Kap. III-6.4.5). Schließlich ist das Bild auf den vollen Grauwertumfang nachgestreckt.

Farbfrequenz (H):

Die Farbe entspricht den aeromagnetischen Meßwerten (Totalintensität) von 33 560 gamma = blau bis 33 760 gamma = rot-magenta. Die aus der aeromagnetischen Karte (1 : 50 000) digitalisierten Isolinien sind in ein Raster system umgesetzt und die Linienzwischenräume interpoliert (Kap. III-6.3). Nachdem die Pixelanzahl verfünffacht war, konnten mit Hilfe einer Lowpassfilterung (9 x 9) die bei der Interpolation entstandenen Grautonsprünge ohne geometrische Veränderung geglättet werden. Nach der geometrischen Registrierung auf die Spot-Geometrie wurde das Bild von 14-70 auf 30-250 nachgestreckt und als Farbe mit folgender Zuordnung überlagert:

magenta	=	ca 33 750 gamma
rot	=	ca 33 730 gamma
gelb	=	ca 33 700 gamma
grün	=	ca 33 670 gamma
türkis	=	ca 33 630 gamma
blau	=	ca 33 600 gamma

Die Sättigung wurde für das ganze Bild konstant bei 150 gehalten. Sie ist schlecht quantifizierbar und kann die Interpretation der Farben beeinträchtigen.

II. IHS-Bild aus dem panchromatischen Spot-Kanal und der magnetischen Totalintensitätsänderung als Farbstufen (Bild 5)

Intensität (I):

Für die Intensität wurde die selbe Verarbeitung wie zur Überlagerung mit den aeromagnetischen Daten verwendet.

Farbfrequenz (H):

Da das Histogramm der Steigungsanalyse nahezu eine Hyperbelform besitzt - kleine Neigungen herrschen vor - mussten die Grauwerte zunächst logarithmisch vorgestreckt werden. Nach einer Vergrößerung wurden mit einem 9 x 9 Lowpassfilter die Interpolationsränder geglättet und das Bild anschließend auf das Spot-Format korrigiert. Um einzelne Größenordnungen von Steigungen deutlicher unterscheiden zu können wurden die Grauwerte (=aeromagnetische Änderungen) schließlich in 7 spektral gleich breite Gruppen zusammengefasst:

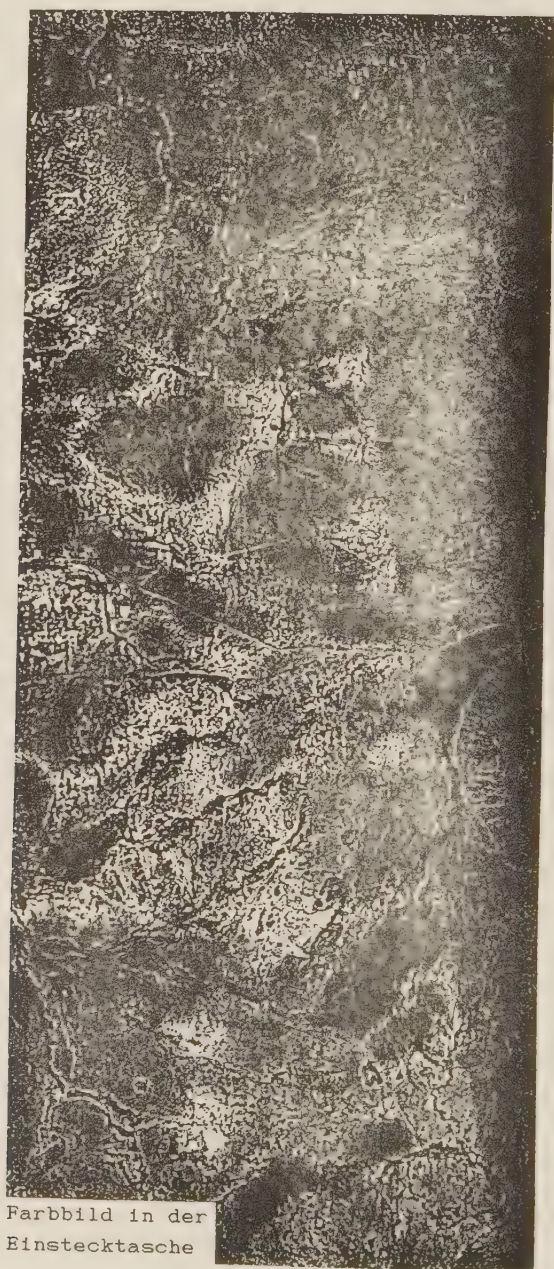
maximale Änderung	rot	=	ca 120 - 140 gamma/km
	gelb	=	ca 100 - 120 gamma/km
	hellgrün	=	ca 80 - 100 gamma/km
	dunkelgrün	=	ca 60 - 80 gamma/km
	türkis	=	ca 40 - 60 gamma/km
minimale Änderung	blau	=	ca 20 - 40 gamma/km
	magenta	=	0 - 20 gamma/km

Die Sättigung ist konstant (170).

Bild 4:

I = Spot-Pan.
H = Aeromag.
S = const. (150)

2km



Farbbild in der
Einstecktasche

Bild 5:

I = Spot-Pan.
H = Totalinten-
sitätsunter-
schied
S = const. (170)

2km



Farbbild in der
Einstecktasche

8.2.2 Stereoskopische Darstellungen

Die Überlagerung der Aeromagnetik als synthetischen Stereoeffekt bietet gegenüber der Überlagerung als Farbe im IHS-Bild zwei entscheidende Vorteile.

1. Das spektrale Signal dreier Spot-Kanäle kann differenziert werden. Besonders der 3. Spotkanal (0.79-0.89 m), der im Reflexionsmaximum der Vegetation liegt, läßt so in der Überlagerung Rückschlüsse auf das relative Bodenwasserspeichervermögen und evtl. oberflächennahe Grundwasservorkommen zu.
Das Problem, daß sich im Stereoeffekt absolute Meßwerte im Gegensatz zur Farbkodierung der IHS-Darstellung nur relativ abschätzen lassen, wirkt sich bei der vorliegenden rein hydrogeologischen Anwendung kaum nachteilig aus.
2. Für den Einsatz der Bilder als Arbeitsgrundlage in Entwicklungsländern, ist das Falschfarbenvorbild das Vertrautere.
Mit dem aus Luftbildern ebenfalls bekannten Stereoeffekt ist es der IHS-Darstellung gegenüber, die weitreichende theoretische Grundkenntnisse und eine größere Einarbeitungszeit erfordert, vorzuziehen.

1. Falschfarbenvorbild mit der Aeromagnetik als Stereoeffekt

(Bild 6/7)

Die 3 Spot-Multispektralkanäle sind je nach Histogramm auf 20 - 230 vorgestreckt, und dann durch eine Highpassfilterung kontrastverstärkt. Die Filtergröße wurde bei speziellen Untersuchungen mit 9 x 9 Pixeln als optimal für die Größe der in diesem Bereich erkennbaren Strukturen ermittelt (Kap. III-4.3).

Die Falschfarbendarstellung grün als blau, rot als grün und nahes IR als rot ist die traditionelle.

Die digitalisierten, aeromagnetischen Totalintensitätswerte sind dieser Falschfarbendarstellung als künstlicher Höheneffekt überlagert, wobei die Maxima 33 760 gamma und die Minima 33 560 gamma entsprechen.

Die Zwischenwerte lassen sich in der stereoskopischen Darstellung nur relativ abschätzen.

II. Falschfarbendarstellung mit der magnetischen Totalintensitätsänderung als Stereoeffekt (Bild 8/9)

Die SpotT-Farbkanäle sind genau wie beim Falschfarben/Aeromagnetikbild vorgestreckt und kontrastverstärkt.

Das Bild der magnetischen Totalintensitätsänderung ist logarithmisch gestreckt, vergrößert und kantengerundet und schließlich invertiert.

Die größten Unterschiede in der Aeromagnetik (140 gamma/km) erscheinen so als Täler bzw. Minima.

Diese inverse Darstellung wurde speziell für die hydrogeologische Auswertung gewählt. Lithologische Grenzen und zum Teil auch Störungen sind häufig mit aeromagnetischen "Hängen" verbunden.

Die als "Täler" dargestellten, größten, aeromagnetischen Änderungen bieten somit höhere Wahrscheinlichkeiten auf Kluftwasservorkommen, als die als Maxima dargestellten aeromagnetisch ruhigen Gebiete.

Trotzdem muß der spektrale Aussagegehalt des Bildes bei der Auswertung im Vordergrund stehen.

IV. THEMATISCHE UND METHODISCHE AUSWERTUNG

1. Übersicht

Das folgende Kapitel beschreibt anhand exemplarischer Auswertungen thematische und methodische Ergebnisse zur Kluftwasserprospektion mit Hilfe von Landsat MSS-Daten, Luftbildern, Spot-Simulationsdaten und den überlagerten Bildprodukten von Spot-Simulations- und aeromagnetischen Daten.

Die Auswertungen wurden regional für das Blatt Dori im Maßstab 1:200 000 und lokal für das Gebiet zwischen Salmossi und Markoy im Maßstab 1:50 000 durchgeführt.

Aufbauend auf der in den letzten Jahren verwendeten Methodik in der Kluftwasserprospektion wurden zunächst Lineamente und das Gewässernetz aus den Landsat MSS-Daten interpretiert.

Der Vergleich der interpretierten Einzellineamente mit den bekannten Brunnen bestätigt die Eignung der Landsat-Daten zur Erfassung von Kluftwasserindizierenden Unstetigkeitsstellen.

Vergleichende Untersuchungen, sowohl zwischen Lineamentdichte und Gewässernetzdichte, als auch zwischen Lineamentdichte und bekannten Brunnen stellten die Methode der Strukturdichteanalyse aus Satellitendaten zur Identifizierung grundwasserhöffiger Zonen zumindest für dieses Gebiet in Frage.

Zur exakten Identifizierung und Lokalisierung von Einzellineamenten und als Vorschläge für konkrete Bohrpunkte wurden die Untersuchungen auf der Basis von Luftbildern und Spot-Simulationsdaten detaillierter fortgeführt.

Dem Problem der schlechten Interpretierbarkeit von Sockelstrukturen in den sandbedeckten Ebenen konnte durch die Integration von aeromagnetischen Daten zumindest teilweise begegnet werden.

Die Lineamentdichteanalyse brachte auch auf dieser Auswertebasis kaum in der hydrogeologischen Anwendung vertretbare Ergebnisse.

Nach Erfahrungswerten auf dem gesamten westafrikanischen Sockel und nach den bevorzugten Abflußrichtungen konnten einzelne Lineamentrichtungen als Strukturen mit höherer Wahrscheinlichkeit auf Kluftwasserführung herausgefiltert werden.

Der Großteil der Lineamente wurde im Gelände überprüft, wobei den als grundwasserhöffig interpretierten Punkten besondere Beachtung geschenkt wurde.

Für das ca 10 x 20 km große Gebiet zwischen Salmossi und Markoy, in dem die großen Aufforstungs- und Anbauflächen der Markoy-Ranch liegen, sind diese "potentiellen Bohrpunkte" exemplarisch auskartiert.

Die weitere Auswahl von Bohrpunkten während eines Bohrprogrammes sollte anhand des lokalen Wasserbedarfs getroffen werden.

Im Vergleich von Daten verschiedener Aufnahmesysteme zeigt das Luftbild immer noch die höchste geometrische Auflösung.

Feinste Reflexionsunterschiede lassen sich aber durch die Verarbeitung spektral differenzierter, digitaler Aufnahmedaten weit besser darstellen.

In Arealen, in denen die Strukturinterpretation, sowohl von Luftbildern, als auch von hochauflösenden Satellitendaten keine Resultate liefert, überzeugt der kombinierte Einsatz von optischen mit aeromagnetischen Daten.

Bekannte lithologische und tektonische Unstetigkeitsstellen können in der synoptischen Betrachtung unter der sedimentären Bedeckung weiterverfolgt werden und lassen eine sicherere Lokalisierung potentieller Bohrpunkte auch in den Bereichen zu, in denen Luft- und Satellitenbilder nur mangelnde Informationen über tieferreichende, geologische Unstetigkeitsstellen beinhalten.

2. Auswertungen von Landsat-MSS-Daten im regionalen Maßstab (1:200 000) im Gebiet des Blattes Dori

Das Gebiet nördlich von Dori, zwischen 14° und 15° nördlicher Breite, dem 0-Meridian und 1° westlicher Länge entspricht dem nördlichsten in Burkina vorliegenden Kartenblatt. Neben der topographischen liegt eine geologische (Delfour, Jeambrun, 1970) und eine aeromagnetische (Terra Surveys, 1977) Karte im Maßstab 1:200 000 vor.

Die Satellitenbilddauswertungen zur Kluftwasserprospektion wurden auf maßstabsgerechten Vergrößerungen kontrastverstärkter Falschfarbendarstellungen der Aufnahmen vom 17.1.76 und 16.4.76 durchgeführt.

Die Geologie des Gebietes ist bereits in Kap. I-3 beschrieben.

Die Auswertung von Landsat-MSS-Daten in der Grundwasserprospektion gehört bereits zu den "klassischen", angewandten Verfahren. Bedingt durch die geometrische Auflösung der Daten dienen die Ergebnisse der Unterscheidung grundwasserhöffiger Zonen bestenfalls auf 150 x 150 m nicht aber der Festlegung von Bohrpunkten. Eine Überprüfung dieser Interpretation und die weitere Einengung kluftwasserhöffiger Zonen erfolgt im lokalen Rahmen auf Luftbildern oder in Zukunft auf höherauflösenden Satellitenbildern. Die endgültige Festlegung des Bohrpunktes erfolgt im Gelände.

2.1 Lineament- und Strukturinterpretation

Die Strukturkarte (Abb. 39) zeigt die in der geologischen Karte (Delfour, Jeambrun, 1970) und die in der interpretierten aeromagnetischen Karte (Terra Surveys, 1977) markierten Störungen. Zusätzlich wurden die aus der Landsat-Szene vom Jan. 76 interpretierten Lineamente mit Längen > 3 km in diese Karte aufgenommen. Die Vorgehensweise bei der Lineamentinterpretation ist in Kap. II-2.1.1 beschrieben.

In dieser Strukturkarte auffällig sind einige sehr lange, das ganze Blatt von SW nach NE durchziehende Lineamente. Sie stammen ebenso wie die längsten, senkrecht dazu verlaufenden NW-SE Strukturen fast ausschließlich aus der Interpretation der aeromagnetischen Karte. Beide Störungsrichtungen sind in anderen Arbeiten bereits beschrieben (Tab. 10) und gelten als bevorzugt kluftwasserführend (Tab. 11).

Alle anderen, wesentlich kürzeren Lineamente oder Störungen stammen aus der geologischen Karte und der Satellitenbildinterpretation.

Weiterhin auffällig ist die räumliche Verteilung der Strukturen (vgl. Dichtekarte Abb. 46). Der im unteren Drittel der Karte E-W-verlaufende lineamentfreie Bereich ist mit Hilfe der geologischen Karte (Abb. 10) oder des Satellitenbildes als Dünengürtel zu identifizieren. Dementsprechend zeigen sich dort nur die "aeromagnetischen" Störungen und einzelne, aus der Vegetationsbedeckung interpretierte Satellitenbildlineamente.

Der nördliche, weitgehend vegetationslose Teil des Blattes mit immer mächtigerer Dünen sandbedeckung auf infrakambrischen Sedimenten läßt eine Lineamentinterpretation kaum zu.

15°

KOMBINIERTE STRUKTURKARTE

aus

1. der geol. Karte 1 : 200 000 (Jelfour, Jeambrun, 1970)

2. der interpretierten aeromagn. Karte 1 : 200 000
(BVGGM, 1977)

3. der Lineamentinterpretation der Landsat-
Falschfarbenverarbeitung vom 17.1.79



bb.39 Strukturkarte
mit Landsat-Lineamenten, Störungen der geol. Karte (Del-
four, Jeambrun, 1970) und der aeromagnetischen Karte
(Terra Surveys, 1977)

= ARIBINDA
= OURSI

= DORI
= PETOY

= GOROM-GOROM
= SALMOSSI

2.3 Lineamentkreuzungspunkte

Der Theorie entsprechend (Kap. I-4.2) ist der Verwitterungshorizont über lithologischen und tektonischen Unstetigkeitsstellen mächtiger.

Über Kreuzungspunkten zweier Störungen ist die mechanische Aufarbeitung noch weiter fortgeschritten, die chemische Verwitterung noch tiefergehend und entsprechend die Verwitterungszone nochmals mächtiger. Die Bereiche von Lineamentkreuzungspunkten sind daher auch bei geschlossenen Klüften im Verwitterungshorizont günstige Grundwasserspeicher.

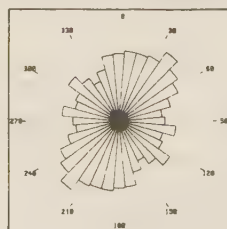
Abb. 41 zeigt die Kreuzungspunkte aller Lineamente aus der Strukturkarte. Grundwasserhöflich sind diese Punkte dann, wenn ein Verwitterungshorizont vorhanden ist und der Punkt morphologisch tief liegt. Für die hydrogeologische Prospektion uninteressant dagegen sind Kreuzungspunkte zweier Lineamente im morphologisch erhabenen Anstehenden.

2.4 Lineamentrichtungsauswertung

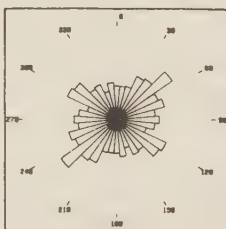
Die kombinierte Lineamentkarte wurde einer statistischen Richtungsauswertung unterzogen. Das Verfahren ist in Kap. II-2.1.1 beschrieben. Berücksichtigt wurden dabei 1154 Lineamente, bzw. Störungen.

Abb 42: Statistische Richtungsauswertung von Lineamenten

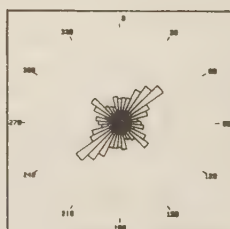
STATISTISCHE LINEAMENTAUSWERTUNG



Anzahl der Lineamente



Mittlere Länge



Gesamtlänge

Berücksichtigt wurden:

- Lineamente der Landsat-Szene vom Jan 1976, länger als 3 km
die Auswertung erfolgte im Maßstab 1 : 200 000
- Störungen aus der geol.Karte 1 : 200 000 Blatt Dori
- Störungen aus der interpretierten aeromagnetischen Karte 1 : 200 00 Blatt Dori

15°

LINEAMENTKREUZUNGSPUNKTE



Abb. 41 Lineamentkreuzungspunkte

Die Auswertung der Anzahl von Lineamenten/Richtung zeigt nur relativ geringe Maxima bei 40° , 100° und 130° . Bemerkenswert ist aber, daß die Richtungen von 0° bis 50° schon die Hälfte aller Lineamente beinhalten.

Diese Richtungen, die nach Engalenc (Tab. 11) auch mehr als 60% der "produktiven" Klüfte in ganz Westafrika umfassen, treten im Arbeitsgebiet also auch häufiger auf.

Die Maxima in den mittleren Längen sind sehr viel deutlicher ausgeprägt.

50° -streichende Lineamente sind im Durchschnitt länger als andere. Nach BRGM (1983) sind die längsten Störungen die tiefstreichenden und die hydrogeologisch interessantesten.

50° -streichende Lineamente können daher in diesem Gebiet als bevorzugt kluftwasserhöflich betrachtet werden.

Im vorliegenden Fall stammen diese besonders langen Störungen, ebenso wie das zweite Richtungsmaximum von $120-130^\circ$, hauptsächlich aus der interpretierten aeromagnetischen Karte.

Die aus den Landsat-Daten interpretierten Doleritgänge weisen ebenfalls diese Streichrichtung auf.

Die grundsätzlichen Tendenzen (häufigste Lineamentrichtungen von $350-50^\circ$ und von $120-130^\circ$ und längste und somit tiefstreichende Strukturen von 50° und ebenfalls $120-130^\circ$) decken sich weitgehend mit den Ergebnissen anderer Untersuchungen in Burkina (Tab. 10).

Tab. 10 Zusammenfassung der Maxima bei Lineamentrichtungsauwertungen in N-Burkina

	nach Krüger A/S (1984)
0°	Faltenachse der Eburneenne Orogenese
$10 - 20^\circ$	Bruchrichtung der panafrikanischen Orogenese
120°	Bruchrichtung der panafrikanischen Orogenese
	nach Delfour, Jeambrun (1970)
$20 - 25^\circ$	Birimien-Faltenachsenrichtung.
45°	Streichrichtung der Markoy-Aufschiebung.
$110 - 115^\circ$	b-Achsen von Faltenstrukturen des Antebirimien bei Lilengo
	Doleritgänge, vorkambrisch
	nach Hottin u. Ouedraogo (1975)
$20 - 45^\circ$	Eburneenne Orogenese
$100 - 120^\circ$	Eburneenne Orogenese, Doleritdykes
	nach Bannert et al (1980)
$0 - 10^\circ$	Störungen und Gänge der westl. Airbegrenzung
50°	Streichrichtung der meisten mittelpräkambrischen Metasedimente.
140°	Birimienrichtung
$170 - 190^\circ$	nicht zugeordnete Lineamentrichtungsmaxima
	nach Terra Surveys (1977)
$55 - 65^\circ$	Nach-Birimien:
$140-160^\circ$	Netz A
$35 - 50^\circ$	Nach-Birimien:
$120-140^\circ$	Netz B
$15 - 65^\circ$	Bruchbündel auf dem gesamten Blatt Dori, dem Markoy-Störungssystem angehörend. Die E-Schollen sind bis 500m nach versetzt.
120°	Richtung von 26 Doleritgängen im Blatt Dori

Eine sichere Zuordnung von Lineamenten und Lineamentrichtungen zu bestimmten orogenen Phasen des Präkambrium ist durch die mehrfache tektonische Überprägung schwierig. Die Streichrichtungen der Störungen und Lineamente werden von verschiedenen Autoren unterschiedlich zugeordnet (Tab. 10).

Da das Arbeitsgebiet im E und W direkt von 2 NE-streichenden Birrimliensynklinorien begrenzt wird, ist der Großteil der 50°-streichenden Lineamente wohl der Eburneenne-Hauptfaltung zuzuordnen.

Die auffälligste und größte Störung, die ebenfalls 20-50°-streichende Markoy-Aufschiebung am E-Rand des Gebietes, ist ebenfalls dieser Orogenese zuzurechnen.

Für die Grundwasserexploration genauso interessant ist die Produktivität von Störungen bestimmter Richtungen (Tab. 11).

Tab. 11 Richtungen bevorzugt kluftwasserführender Lineamente und Störungen

	nach BRGM (1981 u. 1983)
40 - 50°	zu 75% in der Region Djibo-Aribinda
90 - 100°	100% in den Sockelgesteinen der Region Djibo-Aribinda 60% in den Metamorphiten der Region Djibo-Aribinda
30 - 50°	ca 90% der Störungen
60 - 100°	dieser Richtungen in
110-120°	der Region Sebba sind
170-180°	wasserführend
	nach Bagalen (1979) für den gesamten westafrik. Sockel;
20 - 30°	diese beiden Klufrichtungen beinhalten
40 - 50°	60% der produktiven Klüfte
65 - 70°	Klufrichtungen, die
90°	lokal begrenzt sehr
140-160°	günstig sein können

Die NNE bis NE-streichenden Richtungsmaxima bieten anderen Arbeiten zufolge sehr hohe Wahrscheinlichkeiten auf Kluftwasservorkommen. Die längsten vorkommenden Lineamente in dieser Richtung unterstützen dieses Ergebnis.

Für die weiteren Auswertungen im lokalen Maßstab erscheinen diese daher am erfolversprechendsten.

2.5 Gewässernetzauswertung

Neben der Lineamentauswertung ist die Erfassung des Gewässernetzes aus Fernerkundungsdaten das nächste Interpretationsziel für die Grundwasserexploration.

Die Dichte des Gewässernetzes, die Abflußrichtung, der Grad der Verzweigung und der Gewässernetztyp gehören zu den gängigen Interpretationsparametern.

Abb. 43 zeigt das Gewässernetz des Blattes Dori, interpretiert aus der Landsat-Falschfarbendarstellung vom Jan. 1976.

Da Oberflächenwasser im Januar nur noch in den Maren vorhanden ist, wurde das Gewässernetz nach Vegetationsdichteunterschieden kartiert.

Ebenso wie bei der Lineamentanalyse wurde das Abflußsystem digitalisiert und die geradlinigen Talformen richtungsmäßig ausgewertet.

Nach den Wasserscheiden wurden dazu 9 Abflußsysteme (A bis I) unterschieden.

Wie bereits anfangs beschrieben dominieren Abflußrichtungen von NE bis E. Die Abflußrichtungen der verschiedenen Systeme im Einzelnen differieren z.T. stark. Sie unterscheiden sich vereinzelt auch von den in der Lineamentanalyse ermittelten Klufrichtungsmaxima.

Der rein morphologische Einfluß auf die Abflußsysteme ist auf Grund der meist geringen Höhenunterschiede nur schwach, so daß vermutlich kleinräumige tektonische Strukturen oder lithologische Unterschiede die Abflußrichtungen mitbedingen.

Lediglich das Gebiet um Oursi (Abb.44: Bereich F) und die Auswertebereiche in den Birrimienserien im W (D,K) erreichen relative Höhenunterschiede von 50 m.

In diesen 3 Bereichen sind die Bachläufe wesentlich dichter.

E-W Abflußrichtungen in den Bereichen A, B, E, G, H, und I lassen sich leicht erklären. Sie sind eindeutig durch die Stauwirkung der E-W verlaufenden Dünengürtel mit randparallelem Abfluß bedingt.

Weiterhin zuzuordnen, nämlich der Störungsrichtungen der Birrimienphase, sind die Abflußrichtungen 20-50° in den Bereichen A, F, G, H, I und natürlich in den Birrimienserien der Bereiche D und K.

Ebenfalls auf tektonische Anlage mit entsprechendem Lineamentrich-

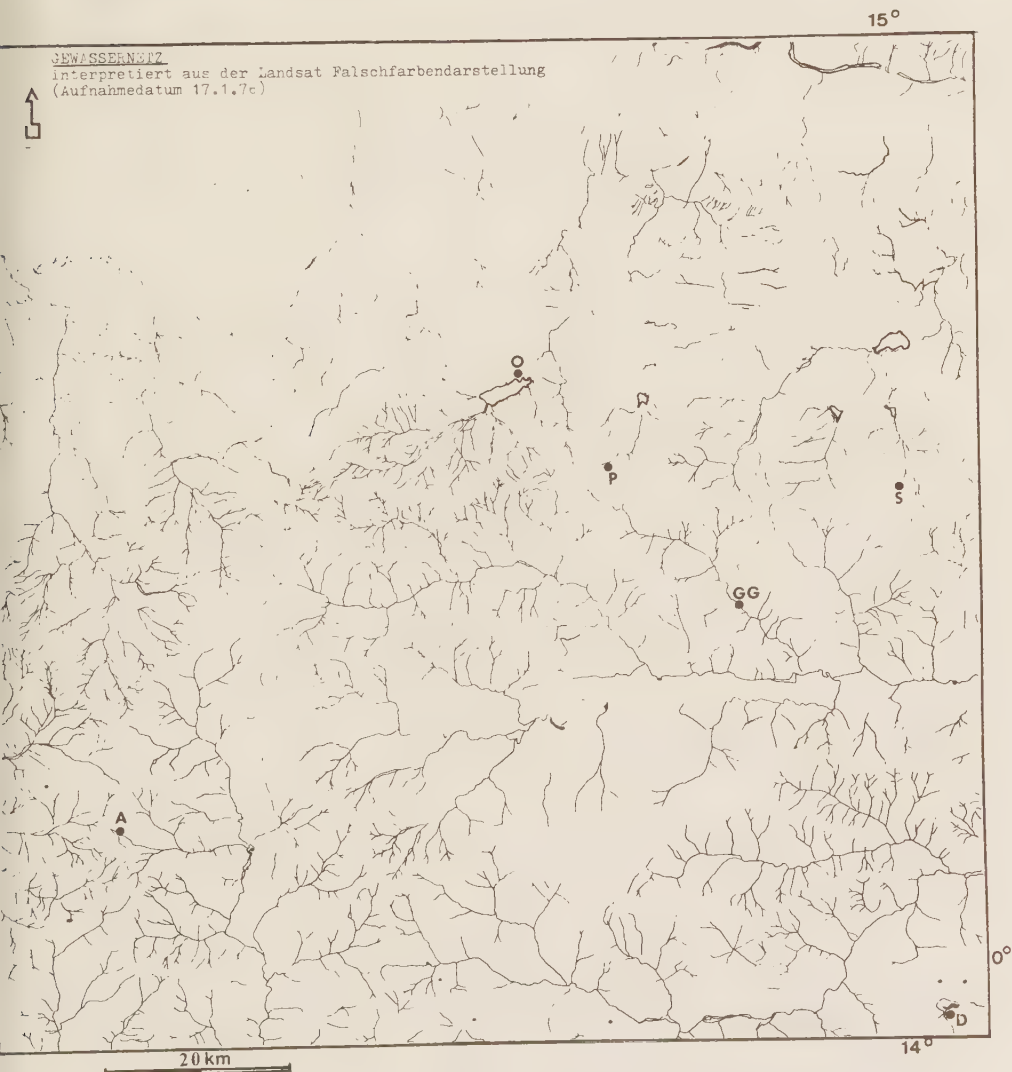


Abb. 43 Gewässernetz
(interpretiert aus der Landsat-Falschfarbendarstellung
vom 17.1.76)



Abb.44 Gewässernetz mit Hauptabflußrichtungen
(Buchstaben markieren Auswertegebiete)

tungsmaximum zurückzuführen sind die 120-130⁰-Richtungen der Systeme B, E, F, G, H.

Die übrigen, von den Lineamentrichtungen abweichenden Abflußrichtungensmaxima sind vermutlich auf Kluftrichtungen zurückzuführen, die sich nur bei Auswertungen im lokalen Maßstab zeigen, oder auf einen lokal begrenzten stärkeren morphologischen Einfluß.

Der Grad des tektonischen Einflusses auf das Gewässernetz läßt sich quantitativ erfassen.

Nach Horton (1945) bilden die Anzahl von Talsegmenten verschiedener Ordnung in einem Entwässerungsnetz annähernd eine inverse geometrische Reihe.

Beginnend mit der 1. Ordnung am Ursprung wird die Ordnungszahl eines Talsegmentes am Zusammenfluß zweier Segmente der nächst niedrigeren Ordnung um eins erhöht, d.h. zwei Bachläufe 1. Ordnung vereinigen sich zu einem 2. Ordnung, zwei 2. Ordnung zu einem 3. Ordnung, usw.

Diese auf einer Zufallsverteilung beruhende Gesetzmäßigkeit ("Horton's law of stream numbers") ist von Ghose et al. (1967), Morisawa (1962), Schum (1956), Strahler (1957) und List (1970) als allgemeingültig bestätigt und auch bei der Auswertung von Fernerkundungsdaten eingesetzt worden.

Abweichungen von dieser Zufallsregel treten auf, wenn die Anlage des Gewässernetzes nicht auf reinen Zufallsprozessen beruht, sondern durch lithologische und tektonische Unstetigkeiten beeinflusst ist.

Die Abweichung von der direkten Verbindungslinie der extremen Ordnungen (Abb. 45) ist somit ein Maß für den lithologischen und tektonischen Einfluß auf die Anlage des Gewässernetzes.

Dieser Einfluß ist am größten in den Flußnetzen C bis G.

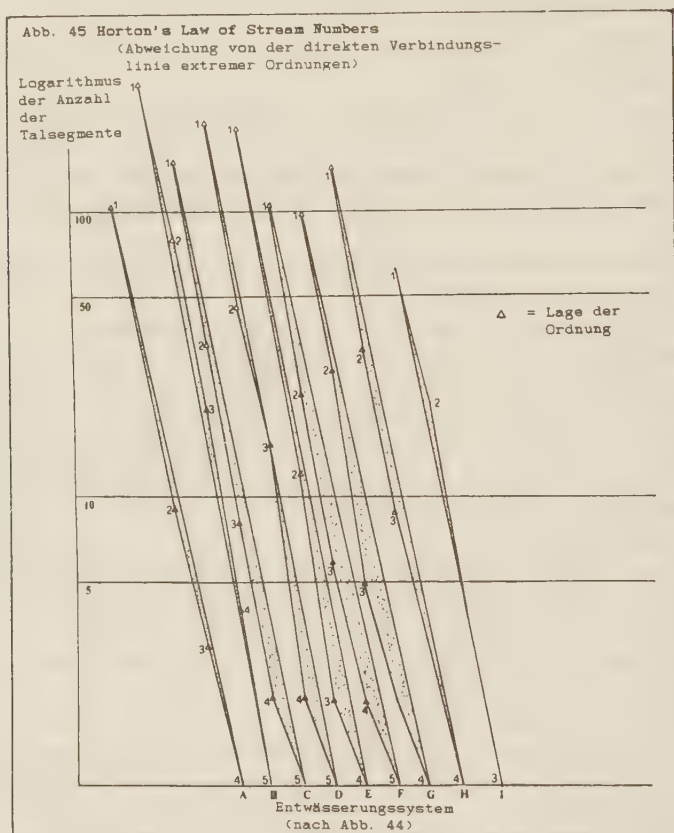
Dieses Ergebnis ist anhand der geologischen Karte erklärbar.

Die Gewässernetze C, D, E und G liegen größtenteils in Bereichen des vulkanosedimentären und stark gefalteten Birrimien.

Bereich F besteht aus nachtektonischen Graniten und Gabbros, ebenfalls des Birrimien.

Alle 5 Bereiche sind nach der geologischen Karte bereits als tektonisch stark überprägt, bzw. verschuppt zu bezeichnen.

C, D, E umfassen die geologische Grenze des westlichen Birrimien-synklinoriums zum unterlagernden Antebirrimienblock.



Eine weitere, berechenbare Größe zur quantitativen Erfassung des Gewässernetzes ist das Bifurkations- oder Gabelungsverhältnis (Horton, 1945). Es gibt an wie viele Fluß- oder Talsegmente bestimmter Ordnung zu einem Segment der nächst höheren Ordnung zusammenlaufen.

Die Schwankungsbreite des Bifurkationsverhältnisses für das Blatt Dori liegt zwischen 3,27 für das Netz A und 4,35 für das Netz F (Tab. 12).

Die Aussagen von Ghose et al. (1967), daß granitische Gesteine durchschnittlich ein höheres Bifurkationsverhältnis aufweisen, können anhand der vorliegenden Daten und den jeweils mehrere geologische Einheiten umfassenden Entwässerungsnetzen nicht bestätigt oder widerlegt werden.

Die Diskrepanz im Gabelungsverhältnis von Netz A zu Netz F ist

wohl eher auf die morphologischen Unterschiede zurückzuführen. Netz A weist die geringsten, Netz F die größten morphologischen Schwankungen im Arbeitsgebiet auf.

Abflußsystem nach Abb. 44. Bifurkationsverhältnis und Lithologie

A	3,27	Granite des Antebirrimien, Orthogneise, Migmatite
B	3,61	starke Verschuppung von Antebirrimien-Graniten, Orthogneisen, Orthoamphiboliten u. spättekt. Gabbros. Das Gebiet ist tektonisch stark überprägt.
C	4,22	Metavulkanite, Serzit- u. Graphitschiefer, z.T. Orthoamphibolithe u. Gneise; tektonisch stark überprägt.
D	4,29	Metavulkanite, Antebirrimien-Granite
E	4,00	Metavulkanite, Antebirrimien-Granite
F	4,35	Amphibolithe u. Gabbros morphologisch erhaben, Antebirrimien-Granite
G	3,9	Antebirrimien-Granite und Gneise im W, Amphibolitschiefer im E
H	4,07	Antebirrimien-Granite, Gneise, Dünensand
I	3,55	Gneise, Diorite, spättekt. Granite
C+D	4,23	
G+H	3,94	

Tab. 12: Abflußsystem, Bifurkationsverhältnis und Lithologie

Insgesamt kann die quantitative Erfassung des Abflußsystems in diesem Maßstab gegenüber der reinen Bestimmung von Abflußrichtungen oder der bloßen Auskartierung von Abflußwegen wenige direkte und praktisch anwendbare Aussagen über Infiltration, Grundwasservorkommen und -erneuerung liefern.

Sie gibt lediglich Sekundärinformationen zur Lithologie und dem Grad der tektonischen Zerrüttung.

2.6 Lineamentdichte, Kreuzungspunktdichte, Gewässernetzdichte

Die Dichteauswertung von Lineamentkarten gehört ebenfalls zu den in der Kluftwasserprospektion häufiger angewandten Verfahren.

Die Methode beruht auf der Annahme, daß größere Lineamentdichten einen höheren Zerrüttungsgrad des Festgesteinssockels und möglichen Kluftwasserspeicherraum indizieren.

Grundwasserhoffige Zonen für die Regional- und Landesplanung wurden nach dieser Methode kartiert (Bannert et al., 1980).

Mit dem Programm "LINISO" (Henkel, 1982) wurde diese Dichtebe-rechnung zunächst für die Lineamente durchgeführt (Abb. 46).

Die Größe einer Meßzelle betrug dabei 2,5 x 2,5 km.

Pro Meßfeld wurden zwischen minimal 0 und maximal 9 Lineamente registriert.

Wie zu erwarten war liegen die absoluten Minima der Lineamentdichte in den Dünenbereichen.

Das Maximum liegt im Kontaktbereich der Metavulkanite des Birrimien mit den spättektonischen Graniten und den Antebirrimien-serien im NW-Teil des Blattes.

Die Grenze Birrimien-Antebirrimien an der W-Seite des Blattes zeichnet sich durch eine in N-S-Richtung angeordnete Reihe relativer Maxima aus.

Weitere relative Maxima decken sich mehr oder weniger mit den in der geologischen Karte (Abb. 10) eingezeichneten Vorkommen von Orthoamphibolithen, die von der Blattmitte nach NW ziehen.

Die Dichteberechnung der Lineamentkreuzungspunkte erfolgte nach dem selben Prinzip und unterstreicht nur die gemachten Aussagen (Abb. 47).

Das Maximum liegt ebenfalls im NW. Von N nach S zieht eine Reihe relativer Maxima am Kontakt Birrimien-Antebirrimien und eine weitere von NW nach SE in den Orthoamphibolithen und spättektonischen Gabbros.

Die interpretierten Lineamentdichten scheinen somit lithologieabhängig.

In einer weiteren Dichteberechnung wurde die Gewässernetzkarte ausgewertet (Abb. 48). Das dichteste, oberflächliche Abflußsystem mit 12 Bachläufen auf einer Fläche von 2,2 x 2,2 km liegt im SW von Oursi, im Einzugsgebiet des Mares.

Im Durchschnitt konnten bei dieser Auswertung 4 Bachläufe pro Meßfeld identifiziert werden.

Das zunächst erstaunlichste Ergebnis erbrachte der Vergleich von Lineamentdichte und Gewässernetzdichte.

Die Lineamentdichtemaxima lagen nämlich meist nicht in den Trockentälern, sondern ebenfalls auf den Wasserscheiden. Die Trockentäler dagegen erschienen in der Lineamentdichtekarte häufig als relative Minima mit oft nur einem Lineament, dem Flußlauf selbst.

15°

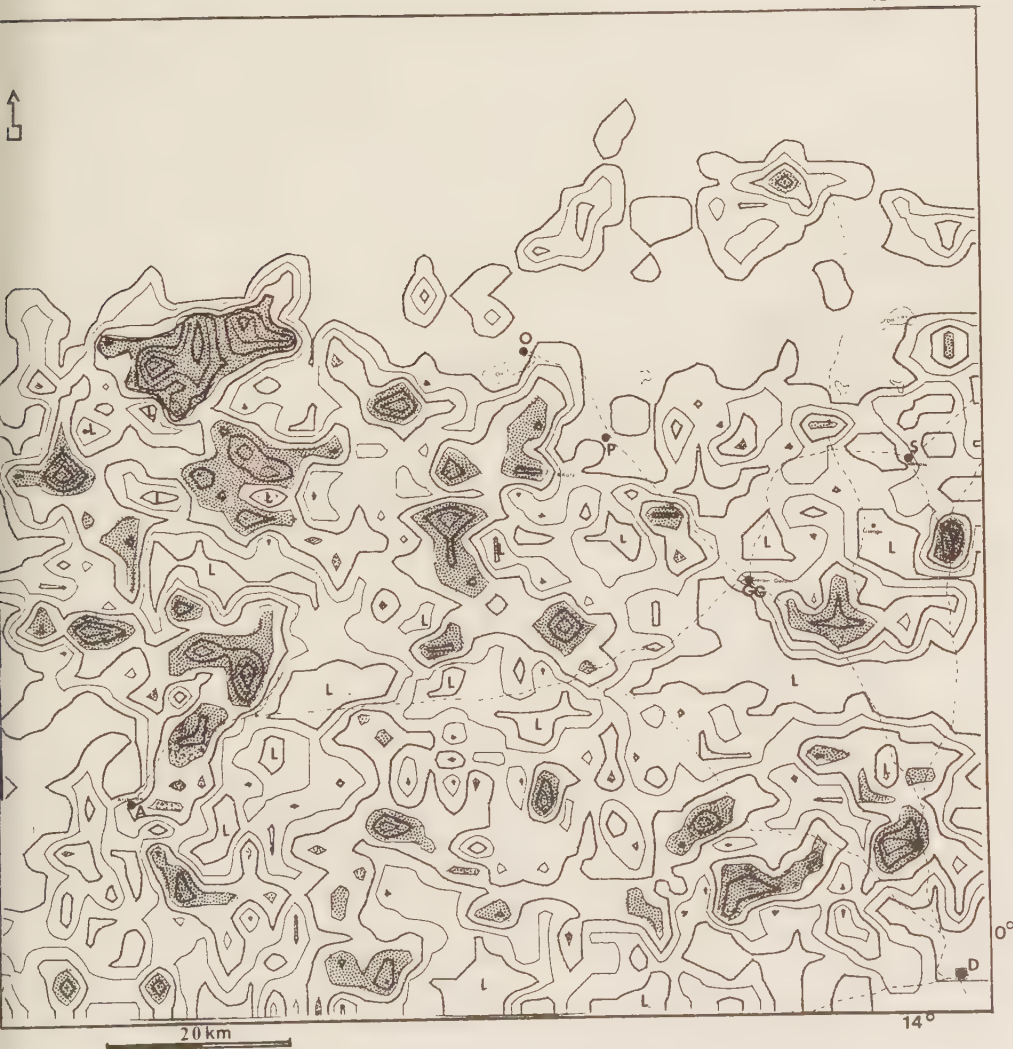


Abb. 46 Lineamentdichte des Blattes Dori
 (Meßfeld für die Berechnung: $2,5 \text{ km}^2$;
 Maximum: 9 Lin./Meßfeld
 Bereiche relativ großer Dichten sind punktiert;
 relative Minima sind mit "L" gekennzeichnet.)

15°

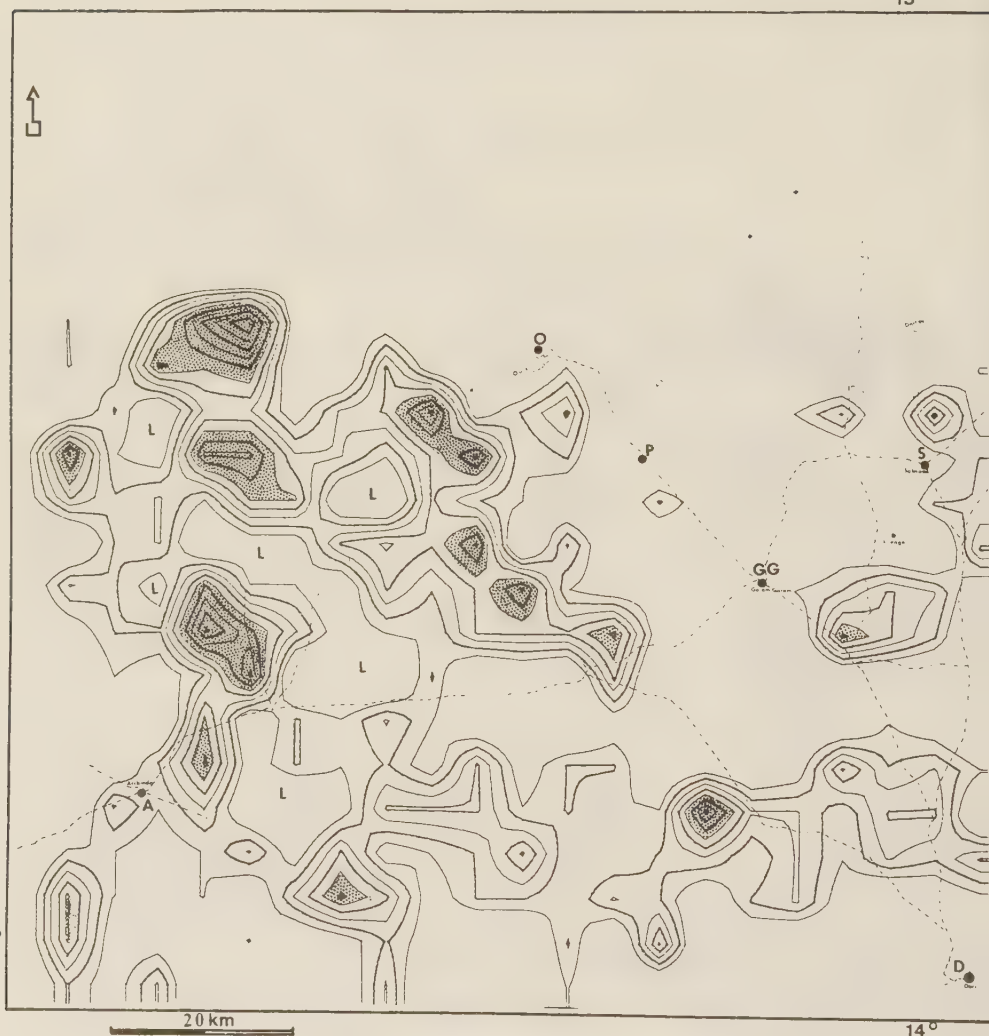


Abb. 47 Dichte der Lineamentkreuzungspunkte des Blattes Dori
 Meßfeld für die Berechnung: $2,5 \text{ km}^2$
 Maximum: 4 Kreuzungspunkte/Meßfeld
 Bereiche relativ großer Dichten sind punktiert;
 relative Minima sind mit "L" gekennzeichnet.

GEWÄSSERNETZDICHTHE

Abb. 48 Dichte des Gewässernetzes des Blattes Dori
 (berechnet aus dem Gewässernetz Abb. 43)
 Meßfeld für die Berechnung: $2,2 \text{ km}^2$
 Maximum: 12 Flußläufe/Meßfeld
 Bereiche relativ großer Dichten sind punktiert;
 relative Minima sind mit "L" gekennzeichnet.

Zusammenfassend kann daraus gefolgert werden:

- Weder anhand der Dichtekarte von Lineamenten noch aus der des Gewässernetzes lassen sich die größeren Trockentäler, also die bevorzugten Grundwasserbohrziele in diesem Gebiet, identifizieren.
- Maximale Lineament- und Gewässernetzdichten liegen im Gegenteil häufig nahe den Wasserscheiden in morphologisch erhabenen Bereichen.
- Auch der Umkehrschluß aus minimalen Dichten Täler abzuleiten, läßt sich nicht halten. Selbst das Argument für die Regionalplanung, hohe Lineamentdichten indizierten kurze Anmarschwege zum nächsten Kluftwasservorkommen (Bannert et al, 1980), ergibt dann keinen Sinn, wenn die Klüfte im Wasserscheidenbereich liegen und daher sehr wahrscheinlich für die Exploration unproduktiv sind.
- Dichteausswertungen von Lineamenten und Gewässernetz zur Identifizierung kluftwasserhöflicher Zonen führen also in diesem Gebiet und zumindest in diesem Maßstab zu völlig falschen Schlußfolgerungen.

Die Gründe, die eine Dichteanalyse für die Grundwasserprospektion im Sahel wertlos machen, wurden im lokalen Rahmen genauer untersucht und sind in Kap. IV-3.2.4 beschrieben.

3. Auswertungen im lokalen Rahmen im Gebiet Salmossi-Markoy

Die zweite Phase der Grundwasserprospektion in Burkina, die Auswertung von Luftbildern und in Zukunft auch von hochauflösenden Satellitendaten, wird für lokal sehr viel begrenztere Gebiete durchgeführt als die Übersichtskartierung aus Landsat MSS-Daten. In diesen Fall liegt das ca 10 x 20 km große Prospektionsgebiet zwischen Salmossi im SW und Markoy am gleichnamigen Mar im E. Beide Orte liegen im Bereich von Dünen und sind je von ca 500 Einwohnern besiedelt.

Im W und SW Markoys liegt im Dünenbereich und südlich daran anschließend die Markoy-Ranch, ein umzäuntes und nicht abgeweidetes Gebiet.

Zwischen den beiden Orten leben in vereinzelt stehenden Hütten nochmals ca 100 bis 200 Menschen.

Offene Wasserstellen sind das Mar von Markoy und ein kleiner Tümpel bei Salmossi, die beide zur Trinkwasserversorgung wenig geeignet sind.

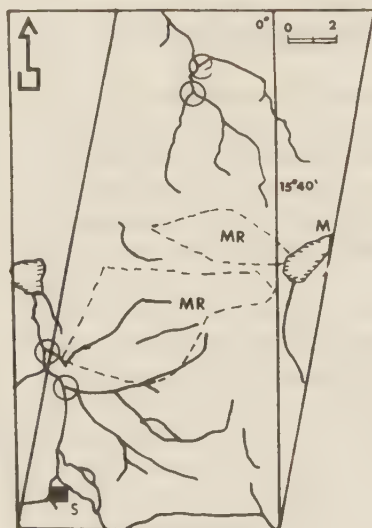
Diese wird aus wenigen, unter 20 m tiefen, porenwassererschließenden Brunnen in den Dünenlanden gedeckt.

Die Tümpel wie die Brunnen fallen in Extremfällen trocken.

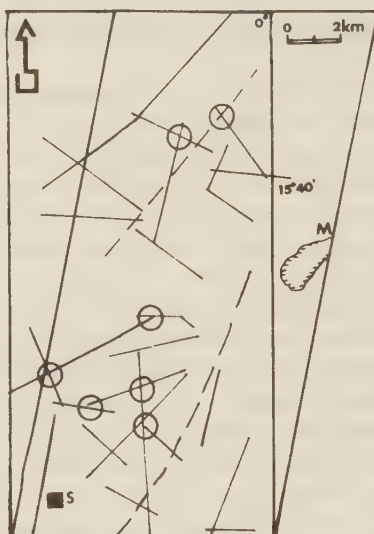
3.1 Lokale Auswertung der Landsat-MSS-Falschfarbendarstellung

Aus den Landsat-Daten, bzw. den Auswertungen im regionalen Maßstab der 1. Phase können relativ grob Zonen potentieller Grundwasservorkommen auch für diesen Gebietsausschnitt bestimmt werden (Abb. 49).

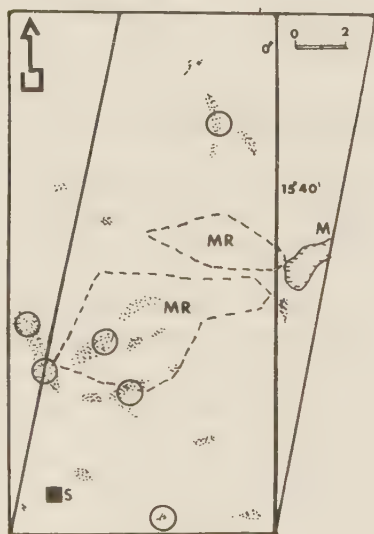
Die dabei interpretierten Zonen müssen in den folgenden Auswertungen von Luftbildern oder Spot-Simulationsdaten detaillierter untersucht werden.



Gewässernetz



Landsat-Lineamente



Zonen dichter, stärker chlorophyllhaltiger Vegetation

S = Salmossi; M = Markoy
MR = Markoy-Ranch

Abb. 49

Gewässernetz, Lineamente und dichte Vegetation zwischen Salmossi und Markoy, ausgewertet im Maßstab 1:200 000 auf der Landsat-Falschfarbendarstellung. Die Kreise markieren Zonen mit potentielltem Grundwasservorkommen, die auf Fernerkundungsdaten größeren Maßstabs und im Gelände detaillierter untersucht werden sollten. (vgl. auch Bild 6-9)

3.2 Auswertungen von Luftbildern, Spot-Falschfarbendarstellungen und Überlagerungen von Spot- und aeromagnetischen Daten.

3.2.1 Lineamentauswertung

Die Abbildungen 50 bis 53 zeigen die Lineamente, die sich bei annähernd gleichem Arbeitsaufwand aus den 4 verschiedenen Datensätzen, bzw. Datensatzkombinationen interpretieren lassen. Alle Auswertungen wurden im Maßstab 1:50 000 durchgeführt.

Die Lineamente der Luftbildinterpretation konnten differenziert werden in solche mit morphologischer Bedeutung und einem Bachbett, in solche mit linearer Anordnung der Vegetation und solche, die auf undefinierten Reflexionsunterschieden, im Allgemeinen der Lithologie beruhen.

Schon der erste Eindruck der 4 Lineamentkarten zeigt Unterschiede in Anzahl und Verteilung der interpretierten Lineamente. 342 Lineamente wurden aus dem panchromatischen Spot-Kanal, 462 aus der Spot-Falschfarbendarstellung, 679 aus den Luftbildern und 615 aus der IHS-Überlagerung des panchromatischen Spot-Kanals mit der Aeromagnetik interpretiert (vgl. Kap. IV-3.2.3).

Die beste geometrische Auflösung haben die Luftbilder. Dies drückt sich in der größten Zahl an interpretierten Lineamenten aus.

Der panchromatische Spot-Kanal im satellitengetragenen System mit 10 m Pixelauflösung hat in diesen Simulationsdaten wie die Spektralkanäle nur eine 20 m-Auflösung.

Er bietet daher, allerdings nur speziell in diesem Fall, die schlechteste Lineamentinterpretationsmöglichkeit.

Weiterhin auffällig ist die Verteilung der Lineamente.

Während in der Luftbildinterpretation Bereiche höchster Lineamentdichte mit vollkommen lineamentfreien abwechseln, scheinen die Lineamente der anderen Auswertungen, insbesondere die der Überlagerung, gleichmäßiger verteilt zu sein.

Dieser Unterschied wird durch die Berechnung der Lineamentdichten verdeutlicht und in Kap. IV-3.2.4 genauer beschrieben.

Lineamentrichtungen und -längen scheinen tendenziell in allen 4 Auswertungen übereinzustimmen.

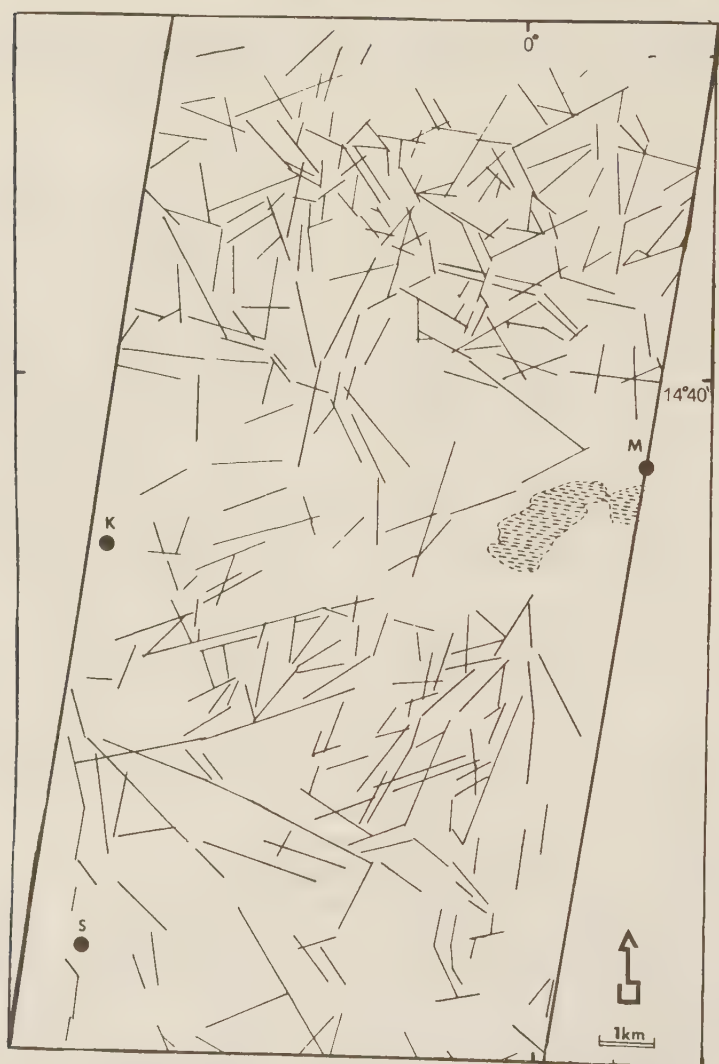


Abb.50 Lineamente, interpretiert aus dem panchromatischen Kanal von Spot

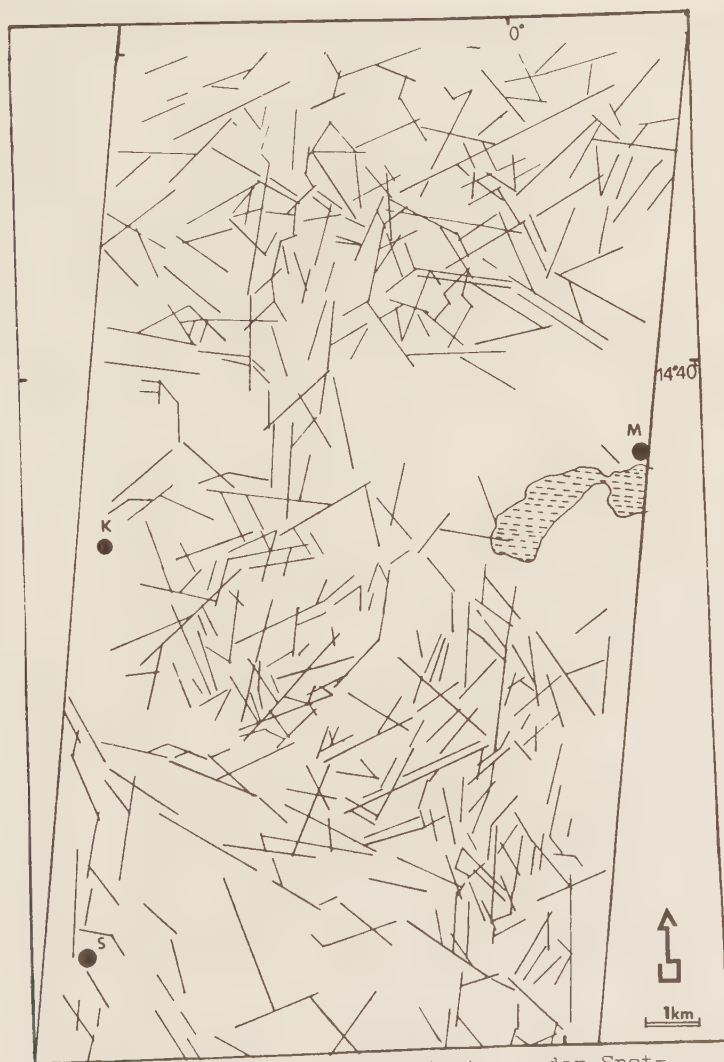


Abb. 51 Lineamente, interpretiert aus der Spot-Falschfarbendarstellung



Abb.52 Lineamente, interpretiert aus Luftbildern
— mit Bach- oder Flußbett
--- mit Vegetationsunterschied
-.- nur durch Reflexionsunterschied

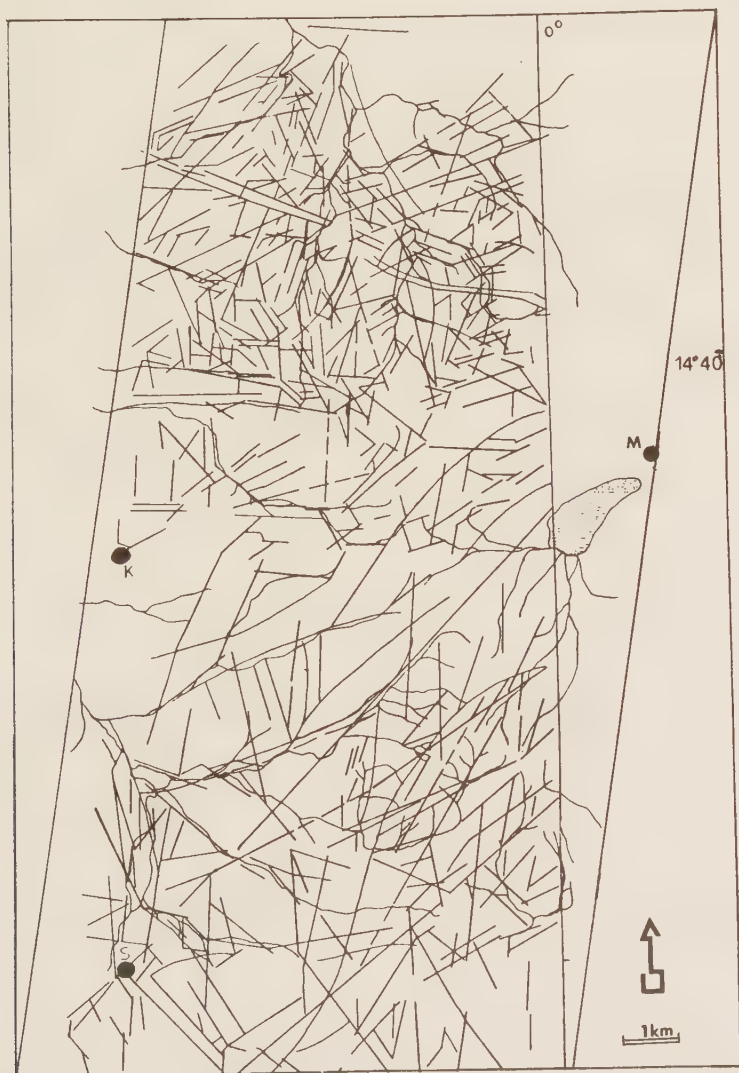


Abb.53 Lineamente, interpretiert aus der IHS Überlagerung des panchromatischen Spot-Kanals und der Aeromagnetik

3.2.2 Auswertung der Lineamentrichtungen

Die vier Lineamentkarten (Abb. 50 bis 53) des Gebietes zwischen Salmossi und Markoy wurden wie die des gesamten Blattes Dori (Abb. 37) einer statistischen Richtungsauswertung unterzogen (Abb. 54 u. 55).

Ein Richtungsmaximum bei 10° ist in allen 4 Auswertungen sehr deutlich. Es entspricht der b-Achsenrichtung der Birrimiensynklinorien. Ein zweites, ENE-gerichtetes, relatives Maximum ist zwar in allen Auswertungen erkennbar, in der Überlagerung aber am deutlichsten ausgeprägt.

Die Schwarz-Weiß- und Falschfarbenabspielungen der Spot-Daten zeigen dieses Maximum nicht so ausgeprägt. Die 70° -Richtung wird also von den aeromagnetischen Daten in der Überlagerung unterstützt.

Verstärkt tritt diese Lineamentrichtung im nördlichen und östlichen Teil des Ausschnittes auf.

In der Luftbilddauswertung ist dieses Maximum zwischen 40° und 80° nur in der Anzahl von Lineamenten pro Richtungssektor erkennbar. Alle Richtungsmaxima in der Luftbilddauswertung sind weniger stark ausgeprägt als in den Spot-Lineamentinterpretationen.

Die deutlicheren Richtungsmaxima in den beiden reinen Spot-Verarbeitungen sind z.T. auf die geringere Anzahl interpretierter Lineamente zurückzuführen, nicht jedoch die eindeutige Ausprägung der beiden Richtungsmaxima in der Überlagerung.

Die Ergebnisse stimmen nur grob mit der im regionalen Rahmen durchgeführten Lineamentrichtungsauswertung (Abb. 42) überein.

Die NE-Richtungsmaxima bei 10° und bei $40-70^{\circ}$ lassen sich nur in der Spot- und Luftbilddauswertung in zwei getrennte Lineamentrichtungen auflösen.

In der Landsat-Auswertung zeigen alle Richtungen zwischen N und NE eine höhere Lineamentanzahl (Abb. 40).

Nach den Auswertungen in benachbarten Gebieten decken sich die Lineamentrichtungsmaxima weitgehend mit denen anderer Interpretationen (Tab. 10). Das 10° -Maximum wird sowohl von Krüger A/S (1984), als auch von Bannert et al (1980) beschrieben und der Eburneenne Faltenachse, der panafrikanischen Orogenese, bzw. dem Störungssystem der westlichen Airbegrenzung zugeordnet.

Das ENE-Richtungsmaximum wird von Terra Surveys (1977) ebenso wie die $140-150^{\circ}$ -Richtung der Nachbirrimienphase zugeordnet.

SPOT panchromatisch

1 : 50.000

342

und

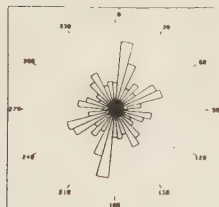
Maßstab der Daten

Anzahl der Lineamente

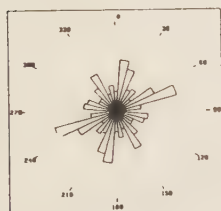
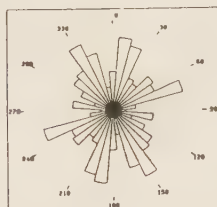
SPOT Falschfarbe

1 : 50.000

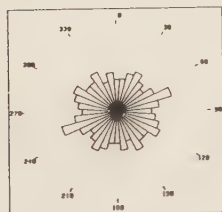
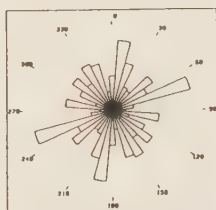
462



Anzahl der Lineamente/Richtung



Gesamtlänge/Richtung



mittlere Länge/Richtung

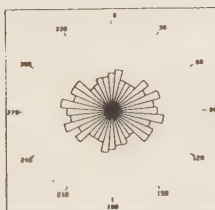


Abb. 54 Richtungsauswertung von Lineamenten aus dem panchromatischen Spot-Kanal und der Spot-Falschfarbendarstellung

* Luftbildlineamente, die ausschließlich auf undefinierten Reflexionsunterschieden beruhen, werden zu ca 60% durch die aeromagnetischen Daten in der Überlagerung verdeutlicht.

Die restlichen 40% sind im Luftbild besser interpretierbar als in der IHS-Überlagerung.

Die SST-Überlagerung (Bild 6/7) mit spektraler Differenzierung verdeutlicht aber auch diese 40% besser als das Luftbild.

3.2.4 Lineamentdichten

Aus den Lineamentauswertungen der Luftbilder und der IHS-Überlagerung wurde die Dichte der Lineamente berechnet.

Zunächst sollte die Dichteanalyse Aufschluß über die räumliche Verteilung der Lineamente zum Vergleich beider Datensätze liefern. Darüberhinaus sollte sie der Identifizierung tektonisch stärker beanspruchter Zonen dienen.

Wie bereits in den Lineamentkarten (Abb. 52 u. 53) zu erkennen war sind die Dichteunterschiede in der Luftbilddauswertung wesentlich größer.

Für ein Dichtemeßfeld von 500 x 500 m liegen die Werte der Luftbilddauswertung zwischen 0 und 9 Lineamenten, die der Spot-Aeromagnetik-Auswertung nur zwischen 0 und maximal 6 Lineamenten.

Da aus beiden Auswertungen ungefähr gleich viele Lineamente digitalisiert wurden (679 bzw. 615) sind die Lineamente in der Überlagerung gleichmäßiger über den ganzen Ausschnitt verteilt.

Die Dichtemaxima liegen in beiden Interpretationen in den selben Bereichen, nicht so aber die Minima.

In der Luftbilddauswertung treten im gesamten Bereich der Düne bei Markoy gar keine Lineamente auf.

In der Überlagerung dagegen sind auch in diesem Bereich noch durchschnittlich 1 bis 3 Lineamente pro Meßfeld erkennbar.

Zusammenfassend läßt sich daraus folgern:

1. Die relativen Maxima der Lineamentdichte sind in den Luftbildern ausgeprägter als in der IHS-Überlagerung von Spot-Daten und der Aeromagnetik.
2. Dünenbereiche zeigen in den Luftbildern keine oder nur sehr wenige Lineamente. Die Überlagerung läßt auch in diesem Bereich noch einige Lineamente erkennen.



Abb.56 Dichteverteilung der Luftbildlineamente

(Bereiche relativ großer Dichten sind punktiert;
relative Minima sind mit "L" gekennzeichnet.)

Dichtemeßfeld 500m x 500m; maximale Dichte 9 Lin./Meßfeld

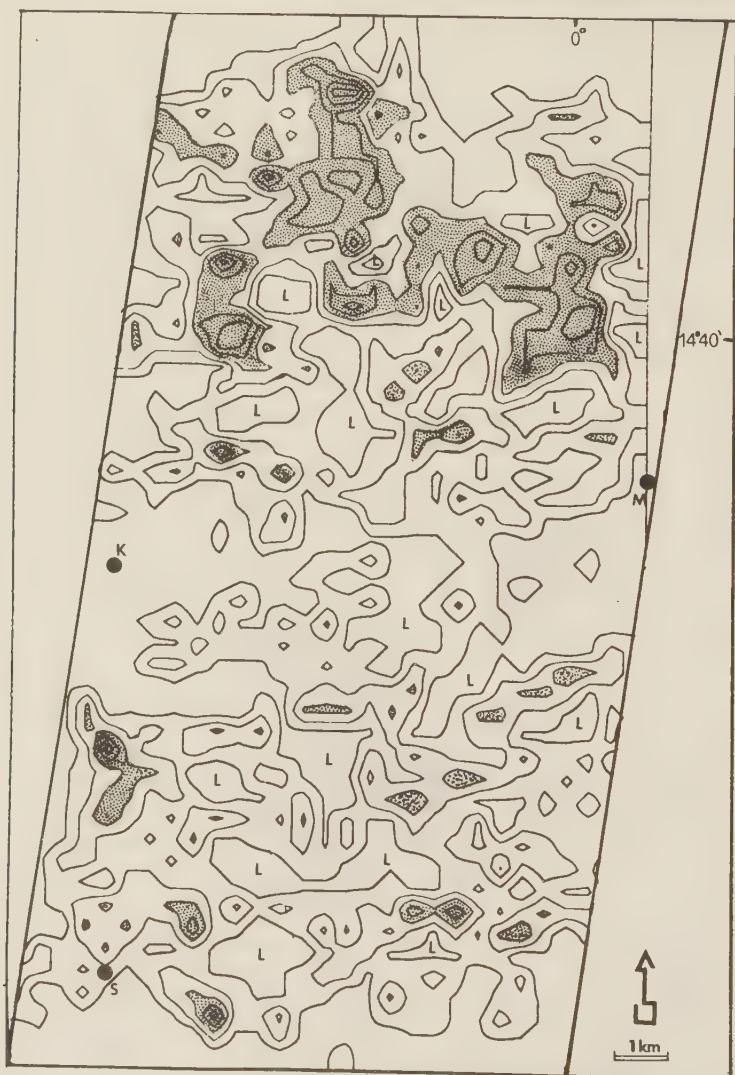


Abb.57 Dichteverteilung der Lineamente Spot-Pan/Aeromagnetik
 Dichtemeßfeld 500m x 500m; maximale Dichte 6 Lin./Meßfeld
 (Bereiche relativ großer Dichten sind punktiert;
 relative Minima sind mit "L" gekennzeichnet.)

Um die Bereiche relativer Dichtemaxima weiter zuordnen und interpretieren zu können, wurden in einem nächsten Arbeitsschritt die relativen Dichtemaxima mit den Einheiten der geologischen Karte (Abb. 58) verglichen.

Eine Korrelation, insbesondere der maximalen Dichte der Luftbildlineamente mit den spätektonischen, alkalischen Graniten war dabei zu erkennen. Diese Granite schienen somit eine erhöhte Klüftung aufzuweisen.

Die Geländearbeit und die weiteren Untersuchungen an den Datensätzen modifizierten dieses Ergebnis.

Die Lineamentdichte in diesem Gebiet steht nur in sehr indirektem Zusammenhang zur Lithologie.

Die Anzahl der interpretierbaren Lineamente hängt von der Oberflächenbedeckung und der Morphologie ab. Anstehendes zeigt höchste (bis 9 Lin./Meßfeld), Dünensand geringste Lineamentdichten (vgl. Abb. 56 u. 57 mit Abb. 59).

Spätektonische Granite weisen in diesem Gebiet deshalb erhöhte Lineamentdichten auf, weil sie morphologisch erhaben anstehen.

Mit dieser Erkenntnis läßt sich auch die Lineamentdichteverteilung für das gesamte Blatt Dori (Abb. 46) erklären.

Dort liegen die größten Dichten (9 Lin./Meßfeld) ebenfalls in den spät- und nachtektonischen Graniten und den Gabbros, aber nicht, weil diese Serien eine höhere tektonische Überprägung aufweisen, sondern weil sie morphologisch erhaben sind und keine Verwitterungs- oder Sedimentdecke aufweisen.

Diese Aussage stellt die gesamte Anwendung der Lineamentdichteanalyse zur Bestimmung stärker geklüfteter Zonen in Gebieten mit wechselnder sedimentärer Bedeckung in Frage.

In keinem Fall läßt sie sich in diesem Gebiet zur Identifizierung kluftwasserhöffiger Zonen einsetzen.

Aus der Lineamentdichte können hier keine Rückschlüsse auf den Zerrüttungsgrad oder den Grad der tektonischen Überprägung und den Kluftwasserspeicherraum gezogen werden, wie dies z. T. geschieht.

Lineamentdichtekarten sollten daher auf keinen Fall ohne die Geländekenntnis interpretiert oder gar weiterverarbeitet werden.

Anmerkung: Lineamentdichten geben nur relative Werte an. Die absoluten Werte (z.B. 3 Lin./Meßfeld) ändern sich mit der Größe des Meßfeldes, dem Auswertemaßstab und weiteren Faktoren.

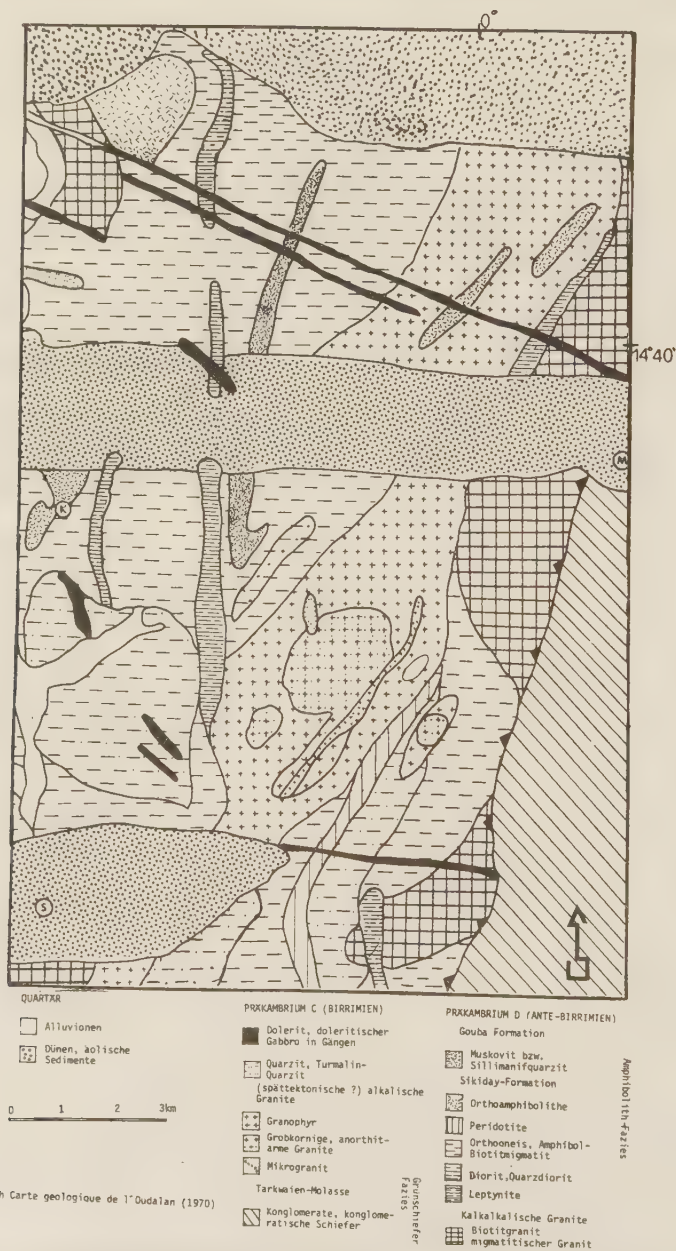


Abb. 58 Geologische Karte des Gebietes zwischen Salmossi u. Markoy (nach Delfour, Jeambrun, 1970)



Abb.59 Oberflächenbedeckung

3.2.5 Abflußrichtungen

Aus der Falschfarbenverarbeitung der Spot-Daten wurden die oberflächlichen Abflußrichtungen des Arbeitsgebietes erfasst und die Talsegmente richtungsmäßig ausgewertet (Abb. 60).

Die Hauptabflußrichtung von NE bzw. SW entspricht in etwa der des gesamten Blattes Dori (Kap. IV-2.5). Sie korreliert aber nicht mit den häufigsten Lineamentrichtungen (vgl. Abb. 54 u. 55).

Dies beweist nochmals die Unabhängigkeit der Auswertungen von Lineamenten und Gewässernetz.

In der Lineamentauswertung sind diese Oberflächenabflußrichtungen eher unterrepräsentiert. Nur 15% der Gesamtlänge von Lineamenten aus der Überlagerung und nur 13,5% aus dem Luftbild streichen mit 30° bzw 50° ; statistisch müssten es je 22% sein.

Setzt man voraus, daß das Gewässernetz, bzw. die Talsegmente nach lithologischen und tektonischen Unstetigkeitsstellen orientiert sind, so lassen die unterschiedlichen Richtungsmaxima von Lineamenten und Abflußsystem u.a. zwei Hypothesen zu:

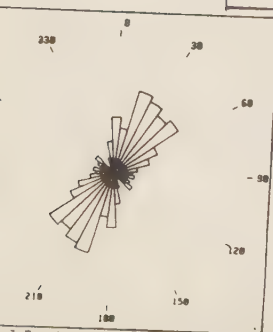
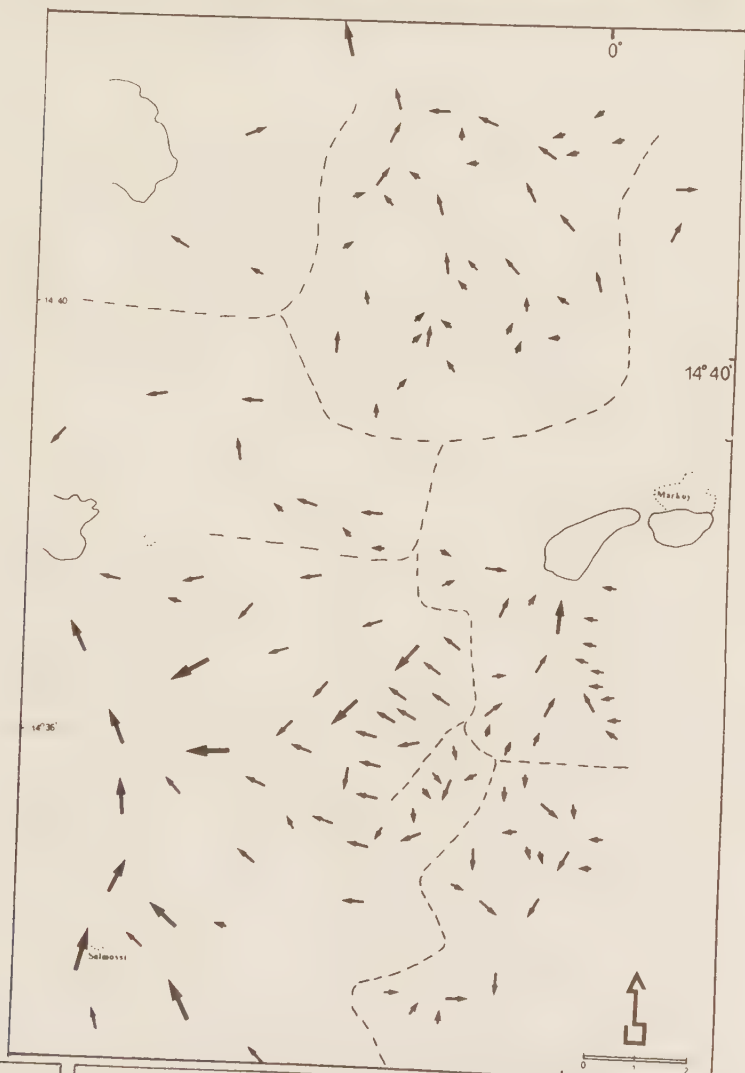
1. Die morphologisch höher gelegenen, spättektonischen Serien, die die meisten interpretierten Lineamente beinhalten, weisen ein anderes Kluftgefüge auf als die älteren, tiefer gelegenen Serien, in denen der Hauptabfluß verläuft. Durch die Sandbedeckung werden die Kluftrichtungen in diesen Migmatiten, Graniten und Gneisen des Präkambrium D bei der Lineamentinterpretation nur unvollständig erfasst. Der Vergleich von Lineamentdichtekarte und geologischer Karte unterstützt diese erste Hypothese.
2. Die Anlage des Gewässernetzes fand zu einer Zeit statt, in der eine zu diesem Zeitpunkt noch vorhandene, sedimentäre Bedeckung andere Abflußrichtungen bedingte, die sich dann ins damalige Liegende durchpauste. Die Sedimente des Infrakambriums bedecken den präkambrischen Sockel heute (noch) 25 km weiter im Norden !

Die Abflußrichtungen im Untersuchungsgebiet entsprechen sehr gut der Streichrichtung der nur maximal 5 km östlich verlaufenden Markoy-Überschiebung.

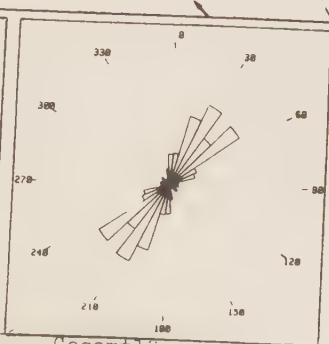
Außerdem entspricht die Hauptabflußrichtung den von Engalenc (1979) beschriebenen, auf dem westafrikanischen Sockel am häufigsten wasserführenden Kluftrichtungen von $0-45^{\circ}$.

Abb. 60

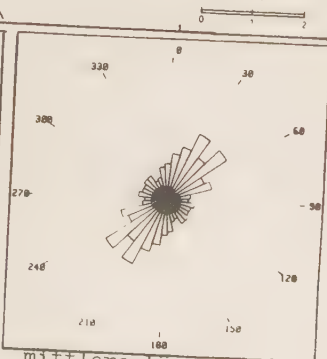
Oberfläch-
liche Ent-
wässerungs-
richtungen
und
Richtungs-
verteilung
der Tal-
segmente



ahl der Talsegmente



Gesamtlänge



mittlere Länge

3.2.6 Richtungsfilterung von Lineamenten

Da neben Lithologie, Sedimentbedeckung und Grad der Verfüllung auch Art und Richtung der Klüfte die Möglichkeit der Wasserführung bedingen, können unterschiedlichen tektonischen Phasen angehörende Klüfte unterschiedlich kluftwasserhöffig sein.

Nach Zusammenfassungen der Richtung produktiver Störungen auf dem gesamten westafrikanischen Sockel (Engalenc, 1979), haben 60% aller wasserführenden Strukturen Richtungen zwischen 0° und 45° . Umgekehrt ausgedrückt bedeutet dies, daß Lineamente mit Richtungen zwischen N und NE die doppelt so hohe Wahrscheinlichkeit auf Wasserführung besitzen wie andere.

Aus diesem Grund wurden aus den Lineamentinterpretationen die Lineamente mit der statistisch doppelt so hohen Grundwasserhöffigkeit herausgefiltert (Abb. 61 u. 62).

Diese Filterung zeigt eine vollkommen neue Lineamentverteilung. Nicht mehr diejenigen Lineamente im morphologisch erhabenen Anstehenden, sondern die tiefergelegenen, vom Abflußnetz verstärkten Lineamente herrschen vor.

Die von Engalenc als kluftwasserhöffig beschriebenen Lineamentrichtungen sind also, wie es bereits die Flußnetzauswertung zeigte, auch bevorzugte oberflächliche Abflußrichtungen.

Wenn umgekehrt aus der Oberflächenabflußrichtung, wie es den Anschein hat, auf mit höherer Wahrscheinlichkeit wasserführende Klufttrichtungen geschlossen werden kann, ist es möglich die Richtungsfilterung noch weiter, genau den Hauptabflußrichtungen entsprechend auf $20-50^{\circ}$ einzuschränken (Abb. 63 u. 64).

Diese Lineamente decken sich fast alle abschnittsweise mit saisonalen Bachläufen.

Auch wenn die Schlußfolgerung von oberflächlicher Abflußrichtung auf die Kluftwasserwegsamkeit nicht eindeutig angenommen werden kann, so markieren diese Lineamente zumindest Linien, die eine erhöhte Infiltration durch größeres und länger zur Verfügung stehendes Oberflächenwasser möglich machen.

Zusätzlich zur reinen Wasserführung sind diese Linien (Abb. 63 u. 64) sehr wahrscheinlich mit tektonischen Unstetigkeitsstellen und einer Kluftwasserspeichermöglichkeit im Zerrüttungsbereich oder der mächtigeren Verwitterungszone verbunden.

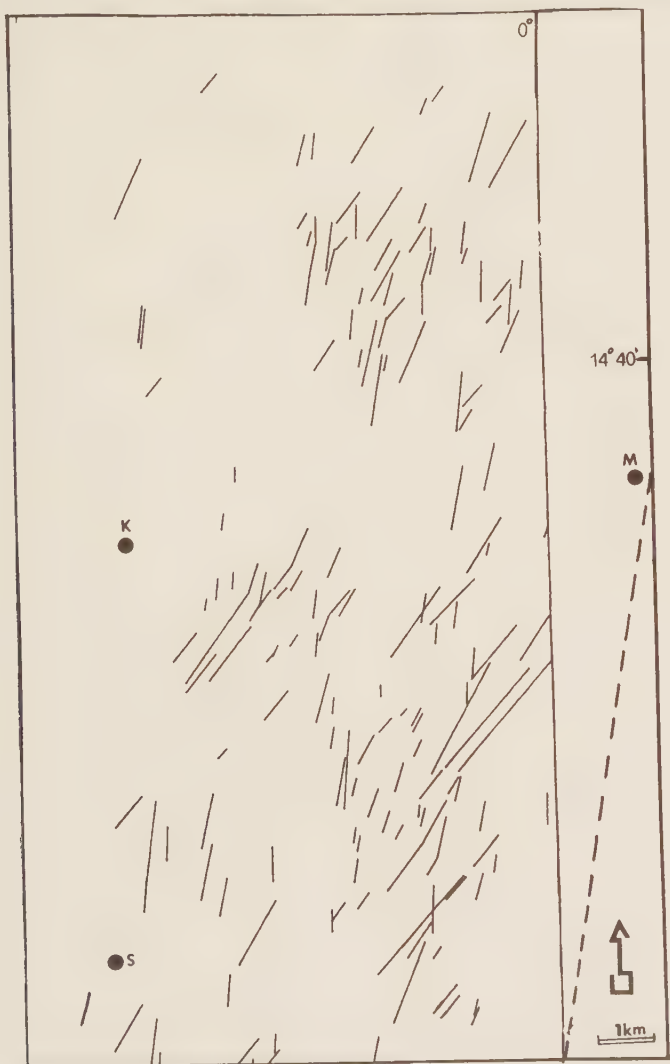


Abb.61 Luftbildlineamente, gefiltert 0°-45°



Abb.62 Lineamente der Überlagerung Spot-Pan/Aeromagnetik, richtungsbefiltert: 0°-45°

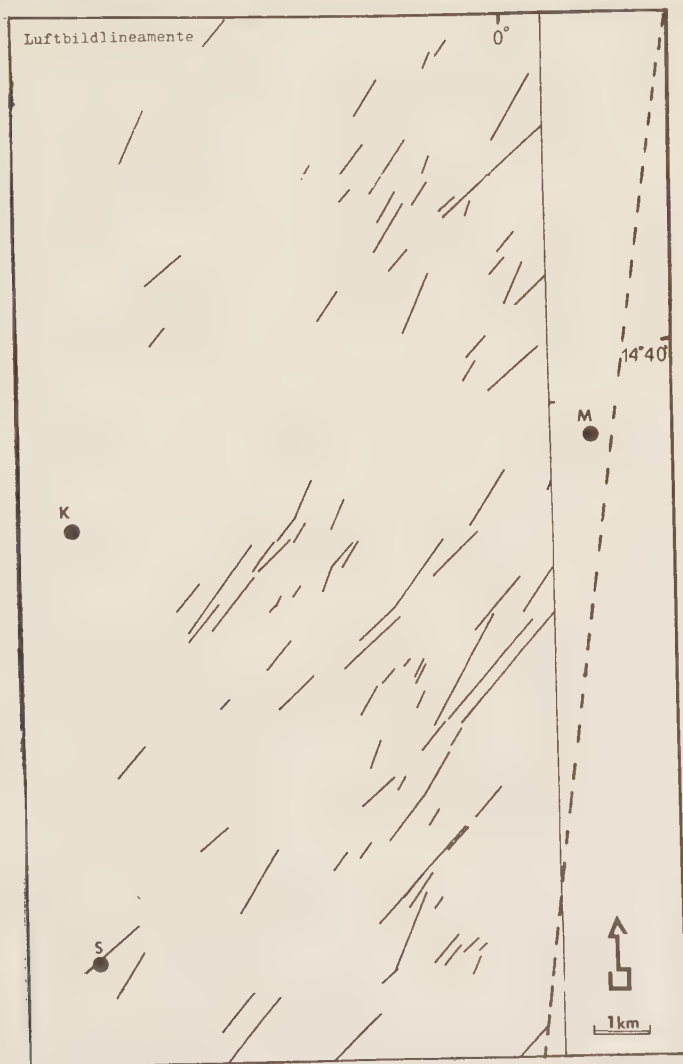


Abb.63 Luftbildlineamente, gefiltert: 20°-50°

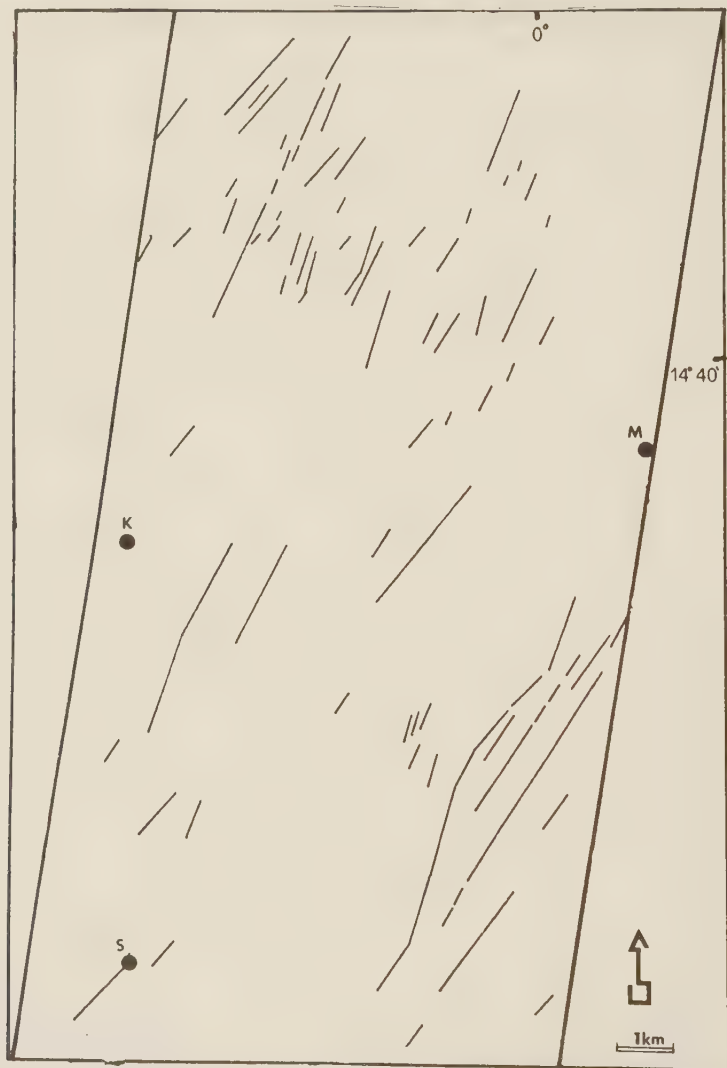


Abb.64 Lineamente der Überlagerung Spot-Pan/Aeromagnetik
richtungsgefiltert: 20°-50°

Nach dieser Filterung ist der Vergleich zwischen Luftbild- und Überlagerungslineamentauswertung wieder interessant.

Im Luftbild haben 75, in der Überlagerung 91 Lineamente Richtungen zwischen 20° und 50° .

Der prozentuale Anteil an Lineamenten parallel zu den Hauptabflußrichtungen ist in der Überlagerung höher.

Dieser Unterschied in beiden Interpretationen ist wohl darauf zurückzuführen, daß aus dem Luftbild relativ mehr für die Grundwasserexploration uninteressante Lineamente in den morphologisch höheren, anstehenden Graniten interpretiert wurden als aus der Überlagerung.

Umgekehrt bedeutet das, daß aus der Überlagerung bei gleichem Aufwand mehr kluftwasserhöffige Lineamente interpretiert wurden als aus dem Luftbild (vgl. Kap. IV-3.2.4, Lineamentdichten).

3.2.7 Lokalisierung grundwasserhöffiger Punkte

Zur Lokalisierung potentieller Grundwasserbohrpunkte aus Fernerkundungsdaten müssen, wie dies exemplarisch für den Ausschnitt zwischen Salmossi und Markoy geschehen ist, alle beschriebenen Verfahren und Auswertungen berücksichtigt werden.

Wichtigster Faktor für die Erfassung oberflächennaher Grundwasservorkommen ist die Vegetation. Vegetationsverdichtungen sprechen zumindest für einen jahreszeitlich erhöhten Bodenwassergehalt.

Aus den Landsat MSS-Daten sind die meist kleinräumigen Bereiche relativer Vegetationsverdichtung oder -veränderung nur beschränkt interpretierbar (Kap. III-3.3).

In den sehr gut auflösenden Schwarz-Weiß Luftbildern kann die Unterscheidung vegetationsbedeckter Oberflächen von anderen, panchromatisch ebenfalls schwach reflektierenden Oberflächen Schwierigkeiten bereiten.

Spektral differenzierende, hochauflösende Daten, wie IR-Luftbilder oder Spot-Multispektraldaten, zeigen Vegetationsunterschiede bei geschickter Wahl des Aufnahmezeitpunktes am besten.

Neben der Vegetation indizieren lithologische Unstetigkeitsstellen die potentiellen Bohrziele.

Die Sandbedeckung kaschiert in diesem Gebiet häufig solche geologischen Grenzen.

Daher ist der Einsatz flächendeckender, geophysikalischer Daten, wie in diesem Fall der aeromagnetischen, zusätzlich zu den Fernerkundungsdaten ratsam.

Um auch unter den klimatisch ungünstigen Bedingungen im Sahel erneuerbares Grundwasser zu erfassen, sind Bohrpunkte relativ nahe an einem oberflächlichen Abflußweg, jedoch nicht im Überschwemmungsbereich oder im Bereich mit erodierter Verwitterungszone zu wählen.

Das Gewässernetz muß dazu erfasst und auf Kreuzungspunkte mit geologischen Unstetigkeitsstellen hin ausgewertet werden.

Die Interpretation grundwasserhöffiger Bereiche in Abb. 65 basiert auf der stereoskopischen Überlagerung der aeromagnetischen Daten, bzw. des Unterschiedes in der magnetischen Totalintensität auf die kontrastverstärkte Falschfarbendarstellung der Spot-Simulationsdaten (Bild 6/7 u. Bild 8/9).

Sie soll von der geometrischen Auflösung her potentielle Bohrziele auf bestenfalls 60 x 60 m eingrenzen.

Die endgültige, von der schwachen Morphologie, vom exakten Geländeeindruck und von der Entfernung zur nächsten bewohnten Ansiedlung abhängige Festlegung eines Bohrpunktes kann nur vor Ort getroffen werden.

Soweit erforderlich müssen zusätzlich geoelektrische Profile senkrecht zu den interpretierten Lineamenten aufgenommen werden.

Die Anwendung der beschriebenen, neueren Verfahren und Methoden grenzt die Geländearbeit auf kleinste Bereiche ein und effektiviert so den Zeit-, Arbeits- und Kostenaufwand wesentlich.

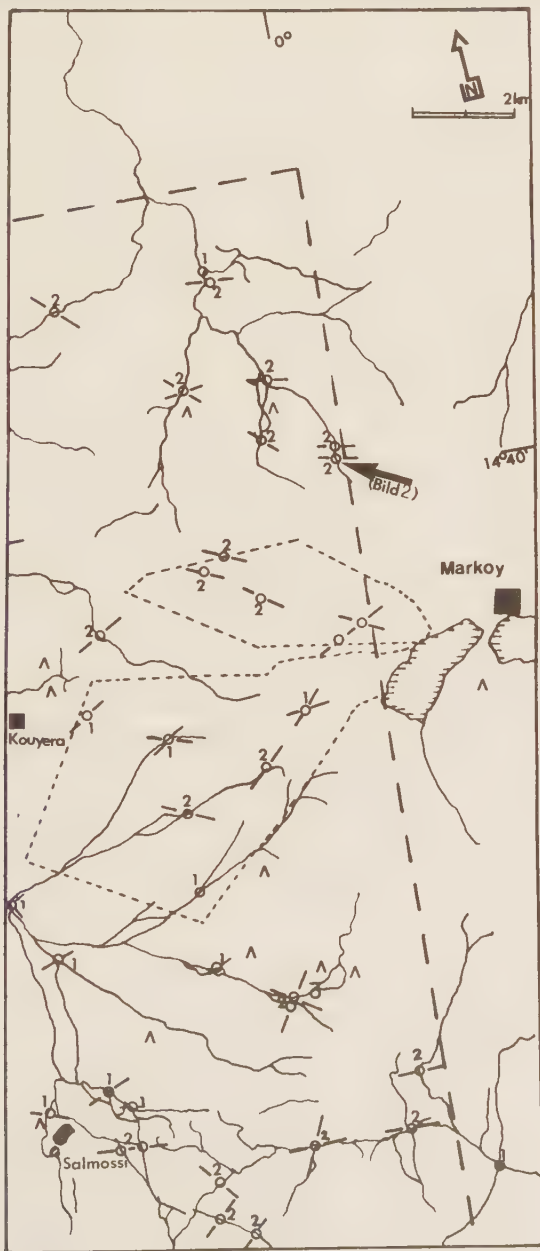


Abb. 65

Interpretation grundwasserhöflicher Punkte aus der Spot-Falschfarbendarstellung mit synthetischem Stereoeffekt aus der Gradientendarstellung der Aeromagnetik.
Die Kreise markieren Punkte mit relativer Vegetationsverdichtung, einem eine Infiltration wahrscheinlicher machenden Bachlauf und gleichzeitig einem Lineament des aeromagnetischen Gradienten (2) oder eines Reflexionsunterschiedes (1).
Die weitere Auswahl der Bohrpunkte muß nach der Entfernung zur nächsten Siedlung getroffen werden. (A = Hütten im Jan. 1985)

Bild 2a und 2b: (nicht für den Druck vorgesehen)

Die Photos zeigen den Kreuzungspunkt eines "Bachbettes" mit dem grundwasserhöffigen Kontaktbereich eines Doleritganges zum umgebenden Granit.

Oben 2a : Blickrichtung nach S, durch das saisonale Bachbett; rechts und links dichte Dornbuschvegetation; in der Bildmitte quer dazu die Grenze des Doleritganges.

Unten 2b : Kluftwasserhöffige Grenze des Doleritganges, in der Mitte quer das Bachbett.

Die Photos demonstrieren die Schwierigkeiten im Gelände solche Kreuzungspunkte selbst bei sehr großen Störungen zu lokalisieren. Dieser potentielle Bohrpunkt ist in Abb. 65 mit einem Pfeil markiert (vgl. auch Bild 6/7 u. 8/9).

ZUSAMMENFASSUNG

Aufbauend auf den bisher eingesetzten Fernerkundungsverfahren in der Kluftwasserprospektion ist es Ziel der Arbeit, diese Methoden zu optimieren, neue, der thematischen Zielsetzung und den Voraussetzungen in Burkina Faso angepasste Bildverarbeitungen zu entwickeln und darzustellen und deren praktische Einsatzmöglichkeit anhand einer exemplarischen Interpretation abzuschätzen.

Der Sahel Burkina Fasos bietet sowohl von den klimatischen, als auch von den geologischen Bedingungen ungünstige Voraussetzungen für die Grundwasserexploration. Um in diesem Gebiet zumindest die Minimalversorgung an Wasser zu garantieren, ist ein erheblicher technischer Aufwand und eine intensive Prospektion nötig.

Trotzdem wurde bisher kaum der Versuch einer Optimierung der fernerkundlichen Prospektionsverfahren unternommen. Lineamentauswertungen wurden auf Standardfalschfarbenverarbeitungen ohne spezielle Strukturverstärkungen durchgeführt. Die nur wenig chlorophyllhaltige Vegetation im Sahel wird in dieser für wesentlich stärker vegetationsbedeckte Gebiete entwickelten Verarbeitung nur unzureichend und unvollständig abgebildet. Die Bedeckung mit fluviatilen und äolischen Sanden schränkt die Interpretation kluftwasserhöffiger Bereiche aus den verwendeten Fernerkundungsdaten noch weiter ein. So blieb die Geländearbeit sehr zeitaufwendig und häufig wenig effektiv. Geophysikalische Profilmessungen konnten nur bei 1/3 aller Bohrungen durchgeführt werden. Da auch die Möglichkeit der Grundwassererneuerung bisher kaum berücksichtigt wurde, war ein beträchtlicher Teil der Bohrungen kaum oder nur für wenige Monate produktiv.

Der praktische Einsatz neuerer Aufnahmesysteme wie Thematic Mapper und Spot, aber auch von Simulations- und experimentellen Daten von Spot, MOMS und Metrischer Kamera erhöhen einmal die geometrische Genauigkeit mit der Auswertungen durchgeführt werden können. Zum Andern bieten sie aber auch die Möglichkeit, die im Sahel oft sehr kleinen Vegetationsflächen geometrisch und vor allem spektral deutlicher zu identifizieren. Sowohl die Anbauflächen, als auch grundwasserindizierende, natürliche Vegetationsverdichtungen können durch spezielle Verarbeitungen dieser Daten dargestellt werden.

Durch eine Highpassfilterung mit Filtergrößen, die genau der Breite von Störungszonen in diesem Gebiet angepaßt sind, werden Strukturen deutlicher interpretierbar gemacht.

Durch die Datenüberlagerung mit aeromagnetischen Daten, die für den gesamten Sahel Burkinas flächendeckend vorliegen, werden kluftwasserhöffige, lithologische und tektonische Unstetigkeitsstellen unter der Sandbedeckung weiterverfolgbar, so daß auch in Gebieten, die in der üblichen Darstellung von Fernerkundungsdaten aufgrund der Oberflächenbedeckung keine Strukturinterpretation erlauben, die Eingrenzung kluftwasserhöffiger Zonen unter der Sandbedeckung möglich wird.

Das Erzeugen solcher Datenkombinationen erfordert sowohl von der Auswahl und Aufbereitung der Datensätze her, als auch zur Festlegung der effizientesten Überlagerungs- und Darstellungsform, ein thematisches Fachwissen über das Prospektionsziel und den engen Kontakt mit dem späteren Interpreten und Anwender des Datenproduktes. Seine technischen Auswertemöglichkeiten werden genauso berücksichtigt wie die Erfahrung bei der Interpretation von Fernerkundungsdaten.

Für Burkina Faso hat sich bei dieser Arbeit die Überlagerung der aeromagnetischen Daten als synthetischen Stereoeffekt auf eine kontrastverstärkte Falschfarbenverarbeitung von Spot-(Simulations)-Daten als die effektivste erwiesen. Eine Farbüberlagerung der Aeromagnetik im IHS-Modell zeigt zu große Einschränkungen bei der Vegetationsinterpretation, die darin nur als Schwarz-Weiß-Information auswertbar ist.

Zudem kommt eine Falschfarbendarstellung und ein aus den Luftbildern bekannter Stereoeffekt den in Burkina bisher eingesetzten vertrauten Darstellungsformen von Fernerkundungsdaten näher als die dort relativ unbekannte IHS-Farbkodierung.

Eine weitere Verbesserung der Auswertebasis liegt in einer den Photopapiereigenschaften angepaßten Abspielung der Daten.

Da Photopapier nur ca 1/4 der berechneten Farbabstufungen wiedergibt, werden durch eine großflächige Filterung, das "Dodging", große, dunkle Bildbereiche aufgehellte und helle abgedunkelt.

Die Grauwert- bzw. Farbsprünge auf kleinen Flächen, die als Lineamente interpretiert werden, bleiben dabei erhalten.

Die exemplarische Auswertung der Spot-Simulationsdaten und der speziell zur Lineamentinterpretation verarbeiteten Überlagerung dienten in erster Linie der Abschätzung des Aussagegehaltes. Gegenüber den bisher nur für Übersichtskartierungen verwendbaren Landsat-MSS-Daten ist die geometrische Auflösung und der spektrale Informationsgehalt von Spot-Daten um so vieles größer, daß ihr Einsatz auch im lokalen Maßstab von 1:50 000 möglich ist. Im Gegensatz zu den in diesem Maßstab bisher ausschließlich eingesetzten Schwarz-Weiß Luftbildern erlauben die Spot-Multispektraldaten im digitalen Datenformat eine problemlose geometrische Anpassung, die beschriebene Kombinationsmöglichkeit mit weiteren Meßdaten und die Wahl einer optimalen Darstellungsform. Auch wenn die geometrische Auflösung, d.h. die Interpretationsmöglichkeit sehr kleiner Flächen, in den Luftbildern besser ist, lassen sich in der Überlagerung Spot/Aeromagnetik bei gleichem Aufwand ungefähr gleich viele Lineamente interpretieren. Die Lineamentverteilung differiert in beiden Auswertungen. Während aus den optischen Daten bevorzugt Lineamente im Anstehenden interpretiert werden, lassen sich aus der Kombination mit aeromagnetischen Daten mehr Strukturen auch in den morphologisch tieferliegenden, sandbedeckten Bereichen interpretieren.

Die Tatsache, daß die interpretierten Lineamente stark von der Bedeckung abhängen, schränkt jede Weiterverarbeitung, aber auch die rein rechnergetragene Auswertung von Lineamenten in diesem Gebiet ein und führt zu Fehlschlüssen, wie beispielsweise der von hoher Lineamentdichte auf kluftwasserhöfliche Zonen.

Für die Festlegung potentieller Bohrpunkte muß jedes Lineament einzeln betrachtet und seine Länge, die Morphologie, die Vegetation und seine Lage zum Entwässerungssystem untersucht werden. NE-streichende Lineamente, die abschnittsweise von Bachbetten begleitet werden, sind die erfolversprechendsten im Gebiet zwischen Salmossi und Markoy und bieten am ehesten die Möglichkeit, erneuerbare Grundwasserreserven zu erschließen.

Insgesamt zeigen diese Untersuchungen, daß durch die konsequente Nutzung der neuen Fernerkundungssysteme und die den speziellen Anwendungszielen angepaßte Verarbeitung von Fernerkundungsdaten, die Ergebnisse der ersten Prospektionsphasen soweit präzisiert werden, daß die Geländearbeit auf wenige eng begrenzte Flächen konzentriert werden kann.

Die Nutzung von Spot- oder Thematic Mapper-Daten sowohl im regionalen, als auch im lokalen Maßstab senkt die Datenbeschaffungskosten.

Aeromagnetische Daten liegen in vielen Entwicklungsländern bereits vor oder können relativ kostengünstig aufgenommen werden. Der finanzielle Mehraufwand für eine anwendungsoptimierte Datenverarbeitung wird durch eine effektivere Geländearbeit und damit eine sinkende Zahl von Fehlbohrungen und höhere Ergiebigkeiten ausgeglichen.

DISKUSSION

In der praktischen Anwendung von Fernerkundungsdaten, sei es im lagerstättenkundlichen, hydrogeologischen, landwirtschaftlichen oder landesplanerischen Bereich, wurden in den letzten Jahren hauptsächlich Standard-Falschfarbendarstellungen von Landsat MSS Daten sowie panchromatische und vereinzelt Infrarotluftbilder eingesetzt.

Sicher ist es für einen mit den Bildverarbeitungsverfahren weniger vertrauten Interpreten wichtig, standardisierte Verarbeitungsverfahren zu definieren und einzuhalten.

Doch schmälert ein striktes Bildverarbeitungsschema ohne Berücksichtigung der thematischen Zielsetzung und der speziellen Gegebenheiten des Arbeitsgebietes den interpretierbaren Informationsgehalt digitaler Fernerkundungsdaten erheblich.

In diesem Zusammenhang sei das beschriebene Beispiel der spärlichen, kaum chlorophyllhaltigen Dornbusch- und Savannengrasvegetation erwähnt (vgl. Kap. III-5.3), die in den Standardfalschfarbendarstellungen fast gar nicht von den vollkommen vegetationslosen Flächen zu unterscheiden ist.

Der ganze Informationsinhalt der Daten neuerer Aufnahmesysteme, wie beispielsweise den 7 Kanälen des TM, kann nur dann wirklich genutzt werden, wenn neue Verarbeitungsmethoden erarbeitet und und mehr neue und thematisch ausgerichtete Standardverarbeitungen definiert werden.

Bei der Entwicklung solcher neuen Verarbeitungen kann problemlos auf ältere, bekannte Darstellungsformen zurückgegriffen werden, so daß auch der reine Interpret mit nur minimalem Einarbeitungsaufwand solche Bilder auswerten kann.

Die bisher sogenannten "Spezialverarbeitungen" müssen, um eine optimale Nutzung von Fernerkundungsdaten zu gewährleisten, vom experimentellen zum praktischen Einsatz gebracht werden.

Die vorliegende Arbeit liefert Beispiele für solche Verarbeitungen, die sowohl thematisch, auf die Grundwasserprospektion, als auch regional, auf den Sahel, und schließlich auf die Auswertekapazität der Anwender ausgerichtet sind.

Neben der Bildoptimierung kann die synoptische Betrachtung verschiedener Datensätze die Effektivität der Auswertung von Fernerkundungsdaten steigern. Dieses an sich alte Modell wird durch die digitale Datenüberlagerung fortgeführt.

Im Gegensatz zur parallelen Betrachtung zweier Karten sind in der digitalen Überlagerung geometrische Unstimmigkeiten korrigiert und thematische Zusammenhänge besser interpretierbar. Dies gilt besonders für die Verknüpfung von thematischen Karten mit Fernerkundungsbildern, die einen Geländeeindruck wiedergeben.

Bei der Verknüpfung verschiedener Datensätze muß allerdings gewährleistet sein, daß jeder Datensatz individuell erkennbar und interpretierbar bleibt.

Die Auswahl und Darstellung der Datensätze richtet sich nach dem Informationswert für die thematische Zielsetzung.

Problematisch ist die Verarbeitung "interpretativer" Datensätze, wie es in der üblichen Anwendung geographischer Informationssysteme geschieht, insbesondere bei einer Kombination mit Meßdaten. Eine digitalisierte, lithologische Grenze, die unter der Sandbedeckung im Sahel über weite Strecken interpoliert ist, erhält in ihrer Überlagerung mit gemessenen Reflexionsdaten leicht einen absoluten Charakter.

Gravierender noch ist die digitale Weiterverarbeitung von Auswertungen aus Fernerkundungsdaten. So kann beispielsweise die Überlagerung einer digitalisierten Lineamentdichtekarte zu gravierenden Fehlinterpretationen über die Klüftigkeit führen (Kap. IV-2.6 u. 3.2.4). Bei der digitalen Überlagerung und somit der gemeinsamen Auswertung von Daten sollte in jedem Fall die Trennung von gemessenen und interpretierten Daten gewahrt bleiben.

Die Ergebnisse der Interpretationen für die Kluftwasserprospektion, aber auch für andere Zielsetzungen sollten nie ohne die Auswertebasis, das Satelliten- oder Luftbild, betrachtet werden. Eine statistische Verarbeitung interpretierter Phänomene kann

zwar der Grundlagenforschung dienen, ist für den konkreten Einsatz aber ungenügend.

Für die Kluftwasserprospektion bedeutet dies, daß jedes Lineament einzeln auf seine Höflichkeit hin untersucht werden muß.

Die Richtungsfilterung von Lineamenten nach bevorzugter Kluftwasserführung kann diese Untersuchung eingrenzen und effektivieren, doch bleiben neben der Richtung noch eine Vielzahl anderer Faktoren, die die Grundwasserführung des Lineamentes oder, soweit nachgewiesen, der Störung, bedingen. Die computergesteuerte Festlegung von Bohrpunkten wird also noch auf sich warten lassen.

Eine weitere dieser statistischen Auswertungen, die bereits des öfteren praktisch eingesetzt wurde, die Lineamentdichteanalyse, hat sich in der Kluftwasserprospektion im Sahel als weitgehend unbrauchbar erwiesen. Dies nicht nur, weil die Anzahl interpretierter Lineamente durch die Erfahrung des Interpreten mitbedingt wird oder weil Abschattungen die Interpretation in Gebietsteilen einschränken, sondern einfach durch die Inhomogenität der Oberflächenbedeckung, die in diesem Fall nur geringen Einfluß auf die Grundwasserhöflichkeit hat.

Zur Lokalisierung eines Bohrpunktes kann auf die Weiterverarbeitung einer Lineamentkarte verzichtet werden. Eher sollten Lineamente verschiedener Datensätze verglichen werden. Noch besser wird die Lineamentauswertung, wie beschrieben, auf einer überlagerten Darstellung der themenrelevanten Datensätze durchgeführt. Die in allen Datensätzen erfolversprechendsten Lineamente werden dann im Gelände überprüft.

Der Einsatz neuer Fernerkundungsdaten und anwendungsoptimierter Verarbeitungen erhöht sowohl die Erfolgchancen von Bohrungen, als auch die Erträge an förderbarem Grundwasser.

Der relativ geringe Mehraufwand für eine anwendungsoptimierte Verarbeitung, der allerdings eine thematische Einarbeitung voraussetzt, macht sich durch die konzentriertere Geländearbeit und durch höhere Erträge bezahlt. Die Gesamtkosten für die dringend nötige und geplante Erschließung neuer, möglichst erneuerbarer Grundwasserreserven im Sahel können durch die intensivere Prospektion sicher gesenkt werden.

AUSBLICK

Am 21. Feb. 1986 wurde der französische Satellit Spot gestartet und sendet seit dem 23. Feb. Daten in der erwarteten Qualität. Die in dieser Arbeit beschriebenen Verarbeitungen von Spot-Simulationsdaten können jetzt flächendeckend und multitemporal im gesamten Sahel eingesetzt werden. Eine regelmäßige Überwachung von Oberflächenveränderungen ist damit alle 5 Tage möglich. Diese Kapazität kann bereits bei den von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe für 1986 in Westafrika geplanten Projekten zur Abschätzung des Vegetationsstandes bzw. für Erntevorhersagen eingesetzt werden.

Die Möglichkeit einer solchen regelmäßigen, großflächigen Überwachung mit dieser Auflösung ermöglicht das Anlaufen nötiger Hilfsmaßnahmen nicht erst mehrere Monate nach einem katastrophalen Erntedefizit, wenn die geringen Ernteerträge bereits verbraucht sind, sondern läßt bereits in der Wachstumsperiode Abschätzungen über die zu erzielenden Erträge zu.

Die Thematic Mapper-Daten bieten grundsätzlich dieselben Möglichkeiten und sollen auch mit dieser Zielsetzung eingesetzt werden. Bisher bereiten allerdings die Bereitstellung und Verarbeitung der Daten noch Schwierigkeiten.

Die Gesellschaft für technische Zusammenarbeit (GTZ) plant in den nächsten Jahren die Installation der mobilen Satellitenbildempfangsstation TRAFES in Westafrika. Mit dieser Empfangsstation werden regionale Einrichtungen wie das Centre Regional de Teledetection de Ouagadougou (CRTO) in der Lage sein, Satellitendaten den eigenen Bedürfnissen entsprechend selbst zu verarbeiten und zu interpretieren.

Die vorliegende Arbeit beschreibt einige der Möglichkeiten speziell in Westafrika einsetzbarer Verarbeitungen und zeigt die lokalen Probleme und Unterschiede zu den standardisierten Verarbeitungen und Auswertungen auf. Besonders der kombinierte Einsatz von Fernerkundungs- und geophysikalischen Daten wird in diesen Gebieten mit kaschierender Sedimentbedeckung intensiviert werden müssen.

Auch wenn in der Anfangsphase des GTZ-Projektes der Einsatz von geographischen Datenbanken und integrierten geophysikalischen und optischen Daten noch nicht in Westafrika selbst durchgeführt

werden kann, so wird das Fernerkundungszentrum in Ouagadougou eine Zusammenarbeit mit europäischen Instituten und Firmen nutzen, um optimale Interpretationsgrundlagen für alle landwirtschaftlichen, hydrogeologischen und lagerstättenkundlichen Projekte zu schaffen.

Für die nächsten 5 Jahre plant die Regierung Burkina Fasos den Bau von 600 neuen Brunnen im ganzen Land. Nach dem beschriebenen Konzept wurden in der Arbeitsgruppe für Photogeologie und Fernerkundung am geologischen Institut der Universität München bereits Spezialverarbeitungen zur Vegetationsdarstellung in den experimentellen MOMS-Daten für ein Gebiet nördlich Ouagadougous hergestellt, die in der Abt. Hydrogeologie des BGR augenblicklich die Auswertegrundlage zur Erfassung kluftwasserhöffiger Punkte bilden. Die auf diesen Auswertungen basierenden Bohrungen werden ab Jan. 1987 durchgeführt.

Die Regenzeit im Sommer 1985 berechtigte zu vorsichtigem Optimismus für die Ernte in diesem Jahr. Wie weit der Vorrat, besonders an Hirse, aber auch an erneuertem Grundwasser tatsächlich reicht, wird sich erst gegen Ende der Trockenzeit im Mai bis Juli dieses Jahres erweisen. Trotzdem schätzt die FAO, daß Afrika 1986 8 Mio Tonnen Importgetreide im Wert von 2,5 Mia. US\$ brauchen wird. Das Problem des alljährlichen Bangens um Niederschlagsmenge und Periodizität im Sahel wird bestehen bleiben, doch kann die in den letzten Jahren steigende Sensibilität in Europa den Problemen dieses Landstriches gegenüber in Form weiterer Projekte zu einer dauerhaften Hilfe beitragen.

Jährlich gehen ca 60 000 km², das ist die doppelte Fläche Belgiens, an die Wüste verloren und weitere 210 000 km², unter ihnen der Sahel Burkinas versteppen so weit, daß sich der Landbau nicht mehr lohnt. Das Aufhalten dieser Entwicklung ist neben dem technischen zu einem finanziellen Problem geworden. 2/3 der bedrohten Länder, auch Burkina, gehören zu den Unterentwickeltesten und Ärmsten der Welt. Alle Projekte in diese Richtung müssen also mit möglichst geringem finanziellen Aufwand durchgeführt werden. Ein erster Schritt dazu ist es, trotz der schlechten Versorgungs-verhältnisse im Sahel das Abwandern der Bevölkerung einzudämmen und die Aufgabe von Anbauflächen und Aufforstungsprojekten zu verhindern.

Dies kann aber nur durch die Garantie der Minimalversorgung mit Wasser und Lebensmitteln geschehen.

Entwicklungsprojekte, wie die Erschließung und der Bau neuer Brunnen, müssen neben der ökologischen Verträglichkeit also besonders effektiv und kostengünstig sein.

Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag in dieser Richtung, zur Erhöhung von Brunnenenerträgen, zur Verringerung von Fehlbohrungen und zur Kostensenkung durch effizientere Geländearbeit nach intensiverer Fernerkundungsprospektion liefern.

LITERATUR

(Aufgeführt ist diejenige Literatur, die im Text zitiert ist, nicht die wesentlich umfangreichere, die einen allgemeinen Überblick über Geologie und Hydrogeologie Westafrikas bzw. über Bildverarbeitung und Datenbanksysteme gibt; Autoren sind in Kleinbuchstaben, Institute und Behörden bzw. deren Abkürzungen in Großbuchstaben zitiert).

- Archambault (1960) Les eaux souterraines de l'Afrique occidentale, 137 S., Berger-Levrault, Nancy
- Armand, Legac, Lesage, Recherches et solutions pour l'alimentation en eau potable de la ville d'Aribinda- Haute Volta, BRGM-hydrogeologie, geologie de l'ingenieur, 3, 151-169, Orleans
- ASECNA (1966) Aperçus sur le climat de la Haute Volta Service meteorologique, 132 S., Ouagadougou
- ASECNA (1970) Tableaux climatologiques, periode 1961-1970, service meteorologique, Ouagadougou
- ASECNA (1980) Tableaux climatologiques, periode 1971-1980, service meteorologique, Ouagadougou
- ASECNA (1981-1984) Bulletin annuelle climatologique, service meteorologique, 8 S., Ouagadougou
- Astier (1981) Evaluations et revisions des etudes geophysiques du Sahel du Haute Volta en vue de l'implantation de forages d'eau, 36 S., FAO, Rom
- Astier, Savadogo, Interet hydrogeologique des cartes aeromagnetiques dans les regions cristallines et metamorphiques, BRGM-hydrogeologie, geologie de l'ingenieur, 1, 53-62, Orleans
- A.V.V (1984) Besoins en eau, semaines de rencontre pour le lancement de l'annee nationale de l'hydraulique villageoise, 5 S., HER, Ouagadougou
- Bannert, Hoffmann, Multidisziplinäre Untersuchungen von Satellitenbildern der Republik Obervolta mit Beiträgen zur Geologie, Bodenkunde, Landnutzung und Hydrogeologie, 83 S., BGR, Archiv Nr. 86 111, Jöns, Kruck (1980) Hannover
- Banninger (1981) Remote sensing of heavy metall stressed vegetation in the visible and near IR, unveröffentl. MSC-thesis, 352 S., ITC, Enschede

- Barth (1977) Der Geokomplex Sahel, Tübinger geograph. Studien 71, 221 S., Tübingen
- BFAI (1982) Kurzmerkblatt Obervolta, Mitteilung der Bundesstelle für Außenhandelsinformation, 7 S., Bonn
- Bodin (1951) Contribution a l'etude des granites birrimien dans le Precambrian de l'Afrique occidentale francaise, SGPM, bull. 12, Dakkar
- Bosum (1981) Anlage und Interpretation aeromagnetischer Vermessungen im Rahmen der Erzsprospektion, Geol.Jb. E 20, 3-63, Hannover
- Bourget, Camerlo, Fahy, Vaillieux (1981) Methodologie de la recherche hydrogeologique en zone de socle cristallin, Bull. BRGM, Sec. 2-III, 4, 273-288 Orleans
- BRGM (1981) Hydraulique villagoise dans le departement du Sahel, Rapport du BRGM, 81 AGE 039,92 S., Orleans
- BRGM (1983) Hydraulique villagoise dans l'ORD du Sahel-Haute Volta, Rapport du BRGM, 083 AGE 028, 106 S., Orleans
- Buckley (1983) The Mochudi groundwater exploration project, Departement of geological Survey GS/DKB/4/84, 130 S., Gabarone
- Buckley (1984) Groundwater exploration at Lethlakeng, Departement of geological Survey, GS/DKB/9/84, 112 S., Gabarone
- Bunnik (1978) The multispectral reflectance of short-wave radiation by agricultural crops in relation with their morphological and optical properties, Ph.D. thesis, 176 S., Landbouwschool, Wageningen, Nederlande
- BURGEAP (1974) Mission Urgence Sahel, Creation de points d'eau dans 26 centres du nord de la Haute Volta, (inedit) HER, 76 S., Ouagadougou
- Chudeau (1910) Note sur la geologie du Soudan, bull. soc. geol. fr., 4, X, 317-332, Abidjan
- CIEH (1984) Utilisations de methodes geophysiques pour la recherche d'eau dans les aquifers discontinus, CIEH-serie hydrogeologie, R543/E1219, 164 S., Ouagadougou

- CILLS (1984) Bulletin agrometeorologique decadaire regionale pour les pays du CILLS, 16, 3 S., Niamey
- Cloos (1922) Tektonik und Magma, Untersuchungen zur Geologie der Tiefen, Bd.1, Abh. Preuss. geol. L.A., NF 89, Berlin
- Conradson, Thyrssted (1985) Analysis of satellite imagery, combined with geophysical and geochemical measurements, Pres. workshop on Remote Sensing in mineral exploration, (unpubl) 24 S., EG, Brüssel
- Coward u. James (1974) The deformation pattern of two archaen greenstone belts in Rhodesia and Botswana, Precambrian Research, 1, 235-250, Amsterdam
- Curran (1985) Principles of remote sensing, 282 S., Longman, London
- Daumain, Furon (1960) Geologie d'Afrique, 2. ed, Payot, Paris
- Defosseze (1958) Contribution a l'etude geologique et hydrogeologique de la boucle du Niger, these univ. Strasbourg, Mem. BRGM, 13, 160 S., Technip., Paris
- Delforme (1951) Geologie de la region de Dori, rapport de fin de campagne, inedit, SGPM, Dakkar
- Delfour, Jeambrun (1970) Carte geologique de l'Oudalan au 1:200 000 avec note explicative, BRGM, Orleans
- Ducellier (1963) Contribution a l'etude des formations cristallines et metamorphiques du centre et du nord de la Haute Volta, Memoires du BRGM, 10, 320 S., Orleans
- Engalenc (1979) Methodes d'etude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest, 192 S., Geohydraulique, 2, CIEH, Maison-Alfort
- Engalenc (1980) Methodes d'etude et de recherche de l'eau souterraine des roches cristallines de l'Afrique de l'Ouest Bull. BRGM (2) III, 4, 271-272, Orleans
- Fa. ESRI Dokumentation zu den GIS-Komponenten PIOS, GRID, GRID-TOPO, (restr. circul.) 11 th ed., 68 S., München
- Fa. Feldle Kurzdokumentation zu DIMAIN im System IFE-GEOPLAN (restr. circul.), 5 S., München

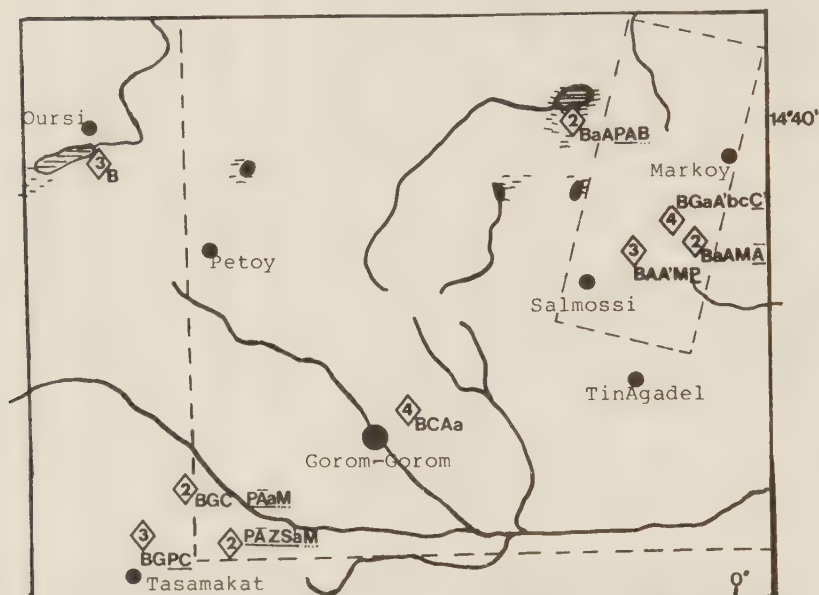
- Fernandez, Haydn,
Henkel (1985) Die Swing-Software an der ZGF,
unveröffentlichtes Benutzerhandbuch,
jüngste Fassung von 1985, Univ. München
- Fischer (1984) "Obervolta" in Fischer Weltatlas
S. 422-423, Fischer Taschenbuchverlag,
Frankfurt
- Ghose, Pandey, Singh,
Lal (1967) Quantitative geomorphology of the
drainage basins in the Central Luni
Basin in western Rajasthan, Z. Geomorph.
N.F., 11-2, 146-160, Berlin
- Gottis, Drogue (1983) Le milieu fissure, BRGM-hydrogeologie,
geologie de l'ingenieur, 1, 17-23,
Orleans
- Gray (1970) Handbook on the principles of Hydrology,
Sec. Canad.-Com. for the intern. Hydro-
logical decade, 280 S., Ottawa
- Guiness, Arvidson,
Leff, Edwards, Blind-
schadler (1983) Digital image-processing, applied to
analysis of geophysical and geochemical
data for Southern Missouri, Economic
Geology, 78, 654-663, St. Louis
- Guiraud (1975) Elements pour une orientation nouvelle
de la recherche des eaux souterrains
dans les regions a substratum metamor-
phiques ou eruptive de l'Afrique occi-
dentale, Memoires IAH, 10, congres
Porto Alegre
- Gustafson (1973) Quantitative Investigation of the
Morphologie of drainage basins using
orthophotographie, 153 S., Münchner
Geograph. Abhlg, 11, München
- Haydn, Dahlke, Henkel
Kaufmann (1982)-1 Multidisciplinary investigations on HCMM
data over Middle-Europe and Marocco,
BMFT Forsch. Ber. HCM-053, 82 S., München
- Haydn, Dahlke, Henkel
Bare (1982)-2 Application of the IHS-color transform
to the processing of multisensor data
and image enhancement, Proc. ERIM-Symp.
599-611, Cairo
- Haydn, Bodechtel (1975) Eine Möglichkeit der anwendungsbezoge-
nen Reduktion multispektraler Daten am
Beispiel von ERTS-1, Raumfahrtforschung
1, 7-11,
- Haydn, Youssef (1982) The application of processed Landsat-
imagery in photo-interpretation,
Proc. IEEE-IGARRS, TP-9.5, 5 S., München
- Haydn (1983) A concept for the processing and display
of TM-data, NASA-Conf. Publ., 4, 217-237,
Greenbelt, Maryland

- Hettner (1934) Der Begriff der Ganzheit in der Geographie, Geograph. Zeitschrift, 40, 141-144, Wiesbaden
- Henkel (1982) Usage of a desktop computer system for geophotogrammetric interpretation of image data, IEEE-IGARRS, WP-5.4, 3 S., München
- Henkel (1986) in praep digital simulation of photographic dodging
- Hobbs (1904) Lineaments of the atlantic border region Geol. Soc. Amer. Bull., 15, 483-506, Baltimore
- Horton (1945) Erosional developement of streams and their drainage basins, hydrophysical approach to quantitaive morphology, Geol. Soc. Amer. Bull. 56, 1,275-370
- Hottin, Ouedraogo (1975) Carte geologique de la Republique de Haute Volta a 1:1 Mio avec note explicative, BRGM, Orleans
- Hubert (1926) Carte geologique de l'Afrique occidentale francaise, Larose, Paris
- Hunter (1974) Crustal developement in the Kaapval Kraton, The Archaen, Precamb. Research, 1, 259-266, Amsterdam
- IGN (1960) Carte de l'Afrique de l'Ouest 1:200 000 Republique de Haute Volta-Dori, IGN-Service geographique, Dakar
- IBM-CNES (1983) Geologic use of a RS-data base, unpublished project plan, 9 S., IBM Research center , Paris
- Jaskolla (1978) Geologisch-tektonische Untersuchungen an Satellitenbildlineamenten in den nördlichen Kalkalpen, 118 S., Diss. Univ. München
- Jensch (1970) Die Erde und ihre Darstellung im Kartenbild, 175 S., Westermann, Braunschweig
- Kaufmann (1986) Rechnergestützte methodische Untersuchungen multispektraler und multi-temporaler Satellitenbilddaten für geologische Fragestellungen am Beispiel AntiAtlas, Marokko, 142 S., Diss. Univ. 142 S., München
- Karrenberg (1981) Hydrogeologie der nichtverkarstungsfähigen Festgesteine, 283 S., Springer , Wien, Ney York

- Kirchhof, Kruck
Mühlfeld, Scholz (1983) Evaluation of multitemporal Landsat data for the detection of surface changes in the Sahel zone, 9 S., 8th canad. symp. on Remote sensing, Montreal
- Kronberg (1985) Fernerkundung der Erde, 286 S., Enke, Stuttgart
- Kruck (1979) Hydrogeological interpretation of Landsat imagery in arid zones of south and west Africa, Proc. 5th Pecora Mem. Symp. 408-416, Sioux Falls
- Krüger A/S (1979) Rapport preliminaire sur la geologie de la region de Zinder-Damagaram, 30 S., (unpubl.), Ingenieurs Conseils, Ouagadougou
- Krüger A/S (1984) Gorom-Gorom rapport de l'implantations de forages, 10 S., (unpubl.), Ingenieurs Conseils, Ouagadougou
- Larsson (1972) Groundwater in granite rocks and tectonic models, Nordic Hydrology, 3, 111-121, Lingby
- Lelong (1966) Regime des nappes phreatiques contenues dans les formations d'alteration tropicale, Mem. Soc. Terre, XI, 2, 201-209
- Lenk (1965) Exploration hydrogeologique du nord-voltaique-Markoy, Darkoy, Kouyera, 17 S., BUVOGMI Nr.1011, Ouagadougou
- Lillesand, Kiefer (1979) Remote Sensing and Image Interpretation 612 S., Wiley and sons, New York
- List (1970) Photogeologische Untersuchungen über Bruchtektonik und Entwässerungsnetz im Präkambrium des nördlichen Tibesti-Gebirges, Zentral Sahara, Geol. Rundschau, 59, 228-256, Stuttgart
- Lotze (1968) Handbuch der stratigraphischen Geologie XIII-2: Das Präkambrium, Enke Verlag, Stuttgart
- Mandel, Shiftan (1981) Groundwater Resources, 269 S., Academic Press, New York, London
- Marcellin (1971) Note explicative de la carte geologique au 1:200 000 Goua-Batie, Ed. BRGM, Arch DGM, Ouagadougou
- Mattauer (1973) Les deformations des materiaux de l'ecorce terrestre, Hermann ed., Paris
- Moik (1980) Digital Processing of Remotely Sensed Images, 212 S., NASA, Scientific and technical information branch, Washington

- Morisawa (1962) Quantitative geomorphology of some watersheds in the Appalachian Plateau, Geol. Soc. Amer. Bull., 73, 9, 1025-1046
Burlington
- Müller (1963) Der Felsbau, Band 1, 624 S., Enke, Stuttgart
- O'Callaghan, O'Sullivan (1982) Imagebased GIS for mineral exploration: The Broken Hill Project, Proc. intern. Symp. on Remote Sensing, 1, 133-137, Fort Worth
- O'Leary, Friedman, Pohn (1976) Lineament, Linear, Lineation: some proposed new standards for old terms, geol. soc. Amer. Bull. 87, 1463-1469
Washington
- ORSTOM (1975) Republique de Haute Volta- Ressources en sols, Cartes a 1:500 000, Serv. centr. de doc. ORSTOM, Bondy
- Peron, Zalachin, Laclavere (1975) Atlas de la Haute Volta, 47 S., IGN, edition j.a., Paris
- Pion (1979) L'alteration des massifs cristallins basiques en zone tropicale seche. Etude de quelques toposequences en Haute Volta, 168 S., these doctorat, Univ. Strasbourg
- Plote (1968) La recherche d'eau souterraine dans les regions arides a substratum cristallin et metamorphiques de l'Afrique occidentale, Bull. BRGM, Sec.III, 2 97-111, Orleans
- Puech (1984) La secheresse au sahel en 1983, Bull. de liaison du CIEH, 55, 30-39
Ouagadougou
- Renard (1973) Atlas de Haute Volta des principaux elements climatiques, 12 S., IGN, Paris
- Rocci (1966) Essai d'interpretation de mesures geochronologiques, La structure de l'Ouest-africain, Soc. de la terre, 10, 3-4, 461-475, Nancy
- Roques (1945) Les series de la boucle du Niger au Soudan, Bull. Soc. geol. fr., 4, X, 523-546,
- Sabins (1978) Remote Sensing - Principles and Interpretation, 426 S., Ed. Library of Congress, San Francisco

- Sawadogo (1982) Contribution de la teledetection a l'etude de la fracturation- application a l'hydrogeologie du socle en milieu intertropical-Haute Volta, 238 S., Diss. Univ. d'Orleans, UER Sciences fondamentales et appliquees
- Schum (1956) Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey, Geol. Soc. Amer. Bull., 67, 5, 597-646, Baltimore
- Siegal, Gillespie (1980) Remote Sensing in Geology, 702 S., Wiley and sons, New York
- Strahler (1957) Quantitative analysis of watershed geomorphology, Amer. geophys. Union Trans, 38,6, 913-920, Washington
- Terra Surveys Ltd (1977) Interpretation du leve aeromagnetique execute sur la partie voltaique du Lip-tako Gourma, 138 S., terra surveys 77-12, Ottawa
- Terrible (1974) Atlas de Haute-Volta, Essai d'evaluation de la vegetation ligneuse, 69 S., Centre voltaique de la recherche scientifique, Bobo Dioulasso
- Trautwein, Greenlee, Orr (1982) Digital data base application to porphory copper mineralization in Alaska - 14 S., Case study summary, USGS-openfile report 82-801
- UNESCO (1976) Atlas geologique du monde, UN-Educat. Scient. and Cult. Organisation, Paris
- Zafiryadis (1982) Application of satellite data to hydrogeological investigations in Damagaram-Mounio, Niger, Proc. ESA-Earsel Symp. ESA-SP-175, 181-189, Igls
- Zall, Russel (1979) Groundwater exploration programs in Africa, in: Satellite Hydrology, Amerc. Water Resources Assoc., 416-425, Sioux Falls
- ZGF (1978) Die Zentralstelle für Geophotogrammetrie und Fernerkundung in München, 42 S., Komm. geowiss. gem Forsch. Mitteilungen VII, 59 S., Bonn



Vegetationsuntersuchungspunkte (nach Terrible, 1975) für den Ausschnitt der vegetationsdarstellenden Verarbeitung (Bild 3) und der Spot-Verarbeitungen (Bild 6-9)

Standort:

- 1 permanent wasserführend
 3 trocken

- 2 periodisch wasserführend
 4 saxicol

Arten:

Xerophile

- A acacia seyal
 A' acacia digitata
 a acacia radiana
 B balanites aegyptiaca
 b boscia senegalensis
 C combretum micranthum
 c commiphora africana
 G guiera senegalensis

Hemi-Xerophile

- A acacia senegal
 A anogeissus
 leiocarpus
 a acacia penata
 C combretum
 glutinosum
 C' combretum nigricans
 P pilostigma
 reticulatum
 S securinega virosa
 Z ziziphus mauritania

Ripicole

- B bautiniana
 rufescens
 M mytragyna
 inermis

Die häufigsten, im Sahel Burkinas vorkommenden Pflanzen
(Tabelle aus Terrible, 1975)

Espèce constante (1) présente dans plus de 50% des relevés :

Balanites egyptiaca

Espèces accessoires (9) présentes dans 25 à 50% des relevés :

<i>Acacia raddiana</i>	<i>Acacia senegal</i>
<i>Combretum micranthum</i>	<i>Boscia senegalensis</i>
<i>Guiera senegalensis</i>	<i>Pterocarpus lucens</i>
<i>Piliostigma reticulatum</i> (P)	<i>Maerua crassifolia</i>
<i>Acacia seyal</i>	

Espèces notolres (9) présentes dans 13 à 25% des relevés :

<i>Adansonia digitata</i>	<i>Combretum glutinosum</i>
<i>Ziziphus mauritiana</i>	<i>Mitragyna inermis</i>
<i>Bauhinia rufescens</i>	<i>Acacia pennata</i>
<i>Anogeissus leiocarpus</i>	<i>Acacia nilotica</i> (P)
<i>Commiphora africana</i>	

Die mit (P) markierten Arten haben einen permanenten Wasserbedarf, d.h. sie sind wie die *Acacia albida* sichere Grundwasseranzeiger.

Photo:

Acacia albida, einer der größten Bäume im Sahel

(Photo nicht für den Druck vorgesehen)

LEBENS LAUF

Günther Kohlhammer
geb. 04.04.1957
in Stuttgart
Eltern Manfred Kohlhammer, Versicherungsdirektor
Rosemarie Kohlhammer, geb. Süßer

1964 - 1967 Grundschule in Stuttgart-Kaltental

1967 - 1976 Math.-nat.wissenschaftl. Schickhardt-Gymnasium
in Stuttgart

1976 - 1983 Studium der Geologie/Paläontologie an der Ludwig-
Maximilians-Universität, München
Diplomarbeit: "Geologische Kartierung und
Luftbildinterpretation im Gebiet um den Funtensee
mit hydrogeologischen Betrachtungen zum Karst-
wasserabflußsystem" (Betreuer Prof. Dr. J. Bodechtel)

1982 - 1986 Wissenschaftlicher Mitarbeiter bei verschiedenen
Forschungsprojekten der Arbeitsgruppe geowissen-
schaftliche Fernerkundung am Inst. für allgem. u.
angewandte Geologie der LMU, u.a. an der
ESOC-Studie: "User Requirements for a future data
base system" (Leitung: Dr. R. Haydn),
am BMFT-Vorhaben: "Nutzeranforderungen an ein
satellitengetragenes MOMS-Aufnahmesystem" (Leitung:
Prof. Dr. J. Bodechtel) und besonders am
BMFT-Forschungsvorhaben "Anwendung eines modifi-
zierten geographischen Informationssystems zur
geologischen Nutzung von Fernerkundungsdaten in
Verbindung mit thematischen Karten" (Leitung:
Dr. R. Haydn)

Verzeichnis der mit "Bild" gekennzeichneten Farabbildungen

Achtung: Die auf den Bildern aufgedruckten Nummern korrespondieren leider nicht mit den im Text der Arbeit angeführten Nummern!

Zur Auffindung des entsprechenden Bildes seien hier die entsprechenden Zuordnungen angegeben.

<u>Nr. im Text</u>		<u>Nr. auf dem Farbbild</u>
Bild 1	Vegetation, multitemporal 1:500 000	Nr. 18
Bild 2	Geländephotos	nicht abgebildet
Bild 3	Vegetation durch Äquiden- sitzen von MSS Kanal 6 1:500 000	Nr. 19
Bild 4	IHS-Überlagerung Spot-Pan./Aeromag. 1:100 000	Nr. 20
Bild 5	IHS-Überlagerung Spot-Pan. u. der magn. Totalintensitätsänderung 1:100 000	Nr. 21
Bild 6/7	Synth. Stereopaar aus Spot-Pan. und der magn. Totalintensität 1:100 000	Nr. 22/23
Bild 8/9	Synth. Stereopaar aus Spot-Pan. und der magn. Totalintensitätsänderung 1:100 000	Nr. 24/25

Die Bilder 6/7 und 8/9 sind Stereopaare.

Die niedrige Bildnummer steht jeweils für das linke die höhere Bildnummer für das rechte Bild.

Für die Betrachtung unter dem Stereoskop empfiehlt sich das Auseinanderschneiden der Bilder.

Die Lage der Bildausschnitte ist in den jeweiligen Kapiteln beschrieben (vgl. III - Bildprodukte).

18

